

"A Treatise on the Steam Engine" by John Farey (1827)

第 5 章 ワット氏の蒸気機関、1769.

(邦訳 S. Yamauchi)

2020 年 2 月 1 日

目次

1	ワット氏の発明	2
1.1	ワット氏の発明の起源	3
1.2	ワット氏の最初の特許、1769	8
1.3	ワット氏の最初の蒸気機関、1775 ~ 1778	12
1.4	ニューコメン機関に対するワット氏の機関の利点	22
2	ワット氏による機関の改良	25
2.1	ワット氏の機関の改良型、1778	25
2.2	ワット氏の機関の他の形式、1780	26
2.3	ワット氏の最初の機関の燃料についての実際の性能	28
3	膨張式蒸気機関	32
3.1	ワット氏の膨張式蒸気機関、1778	32
3.2	ホーンブロアー氏の特許、1781	38
3.3	ワット氏の 2 番目の特許、1781	38
3.4	ワット氏の 3 番目の特許、1782	39
4	ワット氏の単動機関の詳細	45
4.1	ワット氏の鉱山排水ポンプ用単動機関の描写、1788	45
4.2	ワット氏の単動機関の動作	50
4.3	機関の管理	53
4.4	ワット氏の単動機関の種々の部品の細目	57
5	ホーンブロアー氏の 2 段膨張蒸気機関、1781	77
6	蒸気の性質についてのワット氏の実験と研究	88

1 ワット氏の発明

(p309) この価値ある発明の原理は、その独創的な発明者の心の中に浮かんだ方法で記述することによって、最もうまく説明されるであろう。それが完成に至ったステップは、重要な実地的な結果をもたらした極めて鋭い哲学的研究の例として、非常に面白い。

クレランド (Cleland) 氏は彼の "History of the Rise and Progress of the City of Glasgow", 1820 の中で、ワット氏について以下の回顧録を書いた。

ジェームズ・ワット殿は、1736 年 1 月 19 日にグリーンノックで生まれた。彼の父は、その町の尊敬すべきブロック製造者兼船舶雑貨商であった。ワット氏は 1752 年にグラスゴーへやってきて、彼のおじの所に住んだ。早い時期から、また教育を受けている時期の間、ワット氏は機械に対する優れた才能を示した。1754 年に彼はロンドンへ行き、3 年間、哲学的な機器メーカーの同業者組合で年季奉公を行なって、1758 年にグラスゴーへ戻り、彼自身の名でその機器メーカーの仕事始めた。そのアートは当時スコットランドではほんのわずかしら知られておらず、教授たちはそれを奨励したいという願いから、大学の中の三つのアパートメントを使用して彼の仕事を続けるように要請した。この少し後に、ワット氏は彼の機器の販売のための店をグラスゴー大学内に開いた。彼はまた楽器の製造にも興味を示し、オルガンの若干の改良を行なった。

1763 年に、大学の自然哲学の教授のジョン・アンダーソン (John Anderson) 氏が、水を上げるための蒸気機関の小さい実用模型を、修理のためにワット氏の仕事場へ持ち込んだ。それを動くようにする目的でこの機械の原理を考えるなかで、ワット氏はそれが改良できると考えて、間もなく彼は、より大きい改良した蒸気機関の模型を作り始め、グラスゴーのデルフトハウス (Delft-house) に設置した。しかし、彼の実験は完全には成功せず、そして機械は放置された。

この後しばらく経って、彼はグラスゴーの別の場所へ移動した。しかし、1768 年に彼はショップを諦めて、その翌年には土木技師としての仕事を始めた。彼はクライド (Clyde) 川を調査して、その改良についての入念で明快なレポートを書いた。彼はまた、モンクランド (Monkland) 運河の調査実施にも雇われていた。忙しく従事していたが、彼は蒸気機関の改良という壮大な目的を決して捨てなかった。

ワット氏はキャロン鉄工所のローバック (Roebuck) 博士により、土木技師としてたまたま採用された。当時博士は、ハミルトン公爵夫人からキネイル (Kinneil; 原文では Kinneal) で広い石炭工場を賃借していた。博士は彼と協力関係を結び、デルフトハウスに設置した模型の原理を基にして、蒸気機関に関する特許を取得するよう提案した。そのため、翌年ワット氏は 18 インチシリンダのより大きい規模の機関を作り、それをキネイルハウスのオフィスに設置した。この機械は最初のオフセットで彼の非常に楽天的な予想を上回り、1769 年に特許が取得された。

しかし、博士の事業は間もなく行き詰まって負債を負い、協力関係は打ち切られた。しかし、ワット氏の実験の名声はイングランドにまで届いていて、彼はパーミングガムのポールトン氏と有益で幸運な関係を作り上げることができた。ポールトン氏は 1773 年の特許に対するローバック博士の権利を購入し、翌年、ワット氏は最初の機関をソーホー (Soho) へ送り、彼らは特許期限延長に関する議会制定法令を獲得した。そして、それ以降彼らはあらゆる大きさの蒸気機関の製造のために、極めて精力的に取り組むこととなった。

この事業は最も大きい成功を収め、大きな利益を上げた。彼らの機関は、ワット氏の新しい諸発明と蒸気パワーの回転機械への応用で次々と改良された。回転機械への応用は 1784 年頃に完了して、大いに成功した。彼はますます名声を博し続けながら、特許期限が切れる 1800 年までソーホーで仕事を指揮し続けた。その後、彼は協力関係および公的なビジネスから手を引き、引退して残りの人生を有益に過ごした。

機械分野における彼の達成とは別に、ワット氏は一般的な情報にも秀でた人物であった。彼は多くの書物を読み、読んだことを記憶していた。そして、彼の素早い理解力はよく知られたことであったが、彼は才能の劣った人々に対して優越感を覚えるようなことはなかった。彼は古物収集家のように好奇心が強く、形而上学、化学および建築を熟知し、ミュージカルにも親しみ、現代言語の多くに精通していた。

ワット氏は 1784 年にエディンバラの王立協会、1785 年にロンドンの王立協会のメンバーに選ばれ、そして 1787 年にバタビア協会のメンバーに選ばれた。1806 年にグラスゴー市立大学により法学博士の名誉ある称号が彼に与えられ、1808 年に彼はフランスの国立研究所のメンバーに選ばれた。1817 年の彼のグラスゴーへの最後の訪問では、彼は知的な力で満たされており、彼の会話は明るく活気あるものであった。83 才であったそれ以降、彼は青春期のすべての熱意を持って、あらゆる種類の彫刻と彫像を力学的に造形するための機械の発明に専念し、その最も初期の成果の一部を友人に分配した。

長い間彼の国の最も強い光彩を放つ人物の一人であったこの実に偉大な男は、1819年8月25日に、バーミンガム近郊のヒースフィールド (Heathfield) の彼の屋敷で長い尊敬すべき人生を終えて、ハンズワース (Handsworth) に葬られた。

ワット氏は、2度結婚した。最初はカールトン (Calton) の最高行政官の娘のミラー (Millar) 嬢と、後では、グラスゴーの著名な商人であったジェームズ・マグレガー (James M'Gregor) 殿の娘のマグレガー嬢と。彼は、その後彼の仕事を継いで長く携わった1人の息子と、二人の孫娘 (ひとりにはグラスゴーのミラー婦人) を残した。

1.1 ワット氏の発明の起源

(p.310) 1763年当時、ジェームズ・ワット氏は、スコットランドのグラスゴーの数学用機器の製造業者であった。彼は真に哲学的マインドがあり、また科学のすべての分科に精通した人であり、当時スコットランドで最も著名な人々と常に関わりを持っていた。これらの人々の中で、当時は単なる若者であったが後にエディンバラの有名な哲学教授となったロビソン博士、キャロン鉄工所を最初に創業したローバック博士、化学教授のブラック博士、その他の名前が挙げられるであろう。

1759年に、ワット氏は、蒸気的作用で馬車の車輪を回すとのロビソン博士の思いつきの結果として、初めて蒸気のパワーに彼の注意を向けたが、何も試みなかった。1762年に再度ワット氏は、パパンのダイジェスタの中に閉じ込められた非常に熱い蒸気の力について、いくらかの実験を試みた。そして、彼は蒸気のパワーから運動を得るための簡単な模型を作った。これを用いて、彼は現在では高圧機関と呼ばれているものの実現可能性を示したが、それに必要とされた高圧蒸気で動かすことが危険であるため、彼はそれを追いつけなかった。

1763年に、ワット氏は、グラスゴー大学に属しているニューコメン蒸気機関の小さい模型を修理することを引き受けた。そのシリンダは、わずか直径2インチ、行程長6インチであった。それが完全に修理された後、ボイラは実際の機関での比率よりはるかに大きいにもかかわらず、機関に蒸気を十分に供給することができないことを、彼は見出した。そして、それが動作できるようにするためには、ポンプの水柱をより低くして、ピストンに加わる荷重を、実際の機関に対する通常の基準よりかなり低くすることが必要であることを見出した。

模型の性能がこのように極めて著しく悪い原因を考えるなかで、彼は、それはシリンダの小さいサイズに起因しており、また、真ちゅうでできているために、鑄鉄製の大きいシリンダより速く熱を蒸気から奪い去るためであると結論した。なぜなら、小さいシリンダは蒸気が入られたとき非常に強く加熱されて、手で触ることもできなかったことを彼は観察していた。しかし、このようにシリンダに伝えられるすべての熱は、真空が作り出される前の噴射によりシリンダから取り除かれて冷却されねばならず、その後、蒸気の再導入により再び加熱されることになるので、その熱は機関の性能には何も貢献しなかった。蒸気の再導入では必ず蒸気から熱が抜き取られ、かなりの部分が凝縮して無駄になっていた。

発見 機関を改良するワット氏の最初の試みは、金属よりも熱をより遅く伝えるように、木のシリンダを使用するというものであった。彼は木製のシリンダで模型を製造し、亜麻仁油 (linseed oil) に浸して焼いて乾燥した。これを用いて多くの実験を行い、噴射水の比率を少なくすることにより、蒸気の必要量がより減少することが分かった。しかし、その場合、機関の力は大いに弱められ、より良い真空を得るためにより多量の噴射水を吹き込むと、極めて不自然な比率で蒸気が多量に浪費された。

(p.311) 真空中では水は低温で沸騰 (蒸発) するという事実はカレン (Cullen) 博士によって発見され、この頃、ワット氏にも伝わっていて、彼の小さい機関の状況のいくらかの説明を提供したように見えた。なぜなら、熱が木のシリンダにより中に閉じ込められた時、噴射水は真空中で沸騰する程度に十分熱くなるであろう

し、このために蒸気が生じて、それが大気の圧力に対して部分的な抵抗となるかも知れない。水が真空中で沸騰する温度、つまり異なる圧力下で観測される沸騰温度の変化は知られておらず、ワット氏はその主題について一連の実験を開始した。しかし、大気圧以下での蒸気の弾性を試験する簡単な方法がわからず、パパンのダイジェスタの中に閉じ込めた蒸気の弾性を試験することで満足し、種々の温度に加熱した。これらの実験の一連の結果を集め、それを温度を横軸に弾性を縦軸に選んだ曲線として描いた。その曲線では増加の法則性が示されていて、彼は、実験範囲よりも低い温度の蒸気の弾性を表すために、曲線を延長した。

このようにして得られた知識を用いて、彼はシリンダの中で起こっていたことがわかった。なぜなら、蒸気を凝縮するためにシリンダ内へ投入された噴射水は熱くなり、空気が排除された容器内で蒸気となって、それがピストンの上面の大気の圧力に部分的に抵抗し、機関のパワーを減少させたのである。これは、多量の水を投入して真空中で水が沸騰する温度以下まで容器を冷却することにより、直すことができるかも知れない。しかし、それは最初に述べた不具合、つまり蒸気の破壊を増大させ、不可避免的にその液体の水で冷たいシリンダを満たすことになる。

蒸気機関を建造した他の人々は、シリンダをより冷たくすることで排気をより完全にしたので、得られるパワーに比べてより大きな比率で蒸気の消費量を増大させた。彼らはその原因を知らなかったように見えるが、その効果については彼らは敏感であり、ピストン面積 1 平方インチあたり 7 ポンドに等しい荷重を機関にかけることで良しとした。一方、シリンダが完全に排気されたとすると、大気の圧力は更に大きい荷重を持ち上げたであろう。

そして、ワット氏はいくつかの場合について、冷たいシリンダに熱を与える際にどれだけの蒸気が無駄になるかについて考えた。しかし、問題のもっとも基本的部分についてさえ極めてわずかな実験しか行われておらず、水が所定の温度の蒸気になった時にその体積がいくらになるかということも、彼が 1764 年に新たな実験を行ってそれを求めるまで知られていなかった。それ以前に蒸気量に関して受け入れられていた考えは真の値から大きく外れていて、バイトン (Beighton) 氏によりなされた非常に不正確な観察からは、決して導くことのできないものであった。そして、ペイン (Payne) 氏により "Philosophical Transactions" の中で発表された、より正確な実験はさほど知られてもいなかったし、信用されてもいなかった。

所定量の蒸気の体積を求めるワット氏の方法は、細いフローレンスフラスコを空気と同じ弾性の蒸気で満たすものであり、そして、正確にその重さが量られた後、それを水で満たして再び重さが量られ、さらに空のフラスコ自身の重さが量られた。三つの重さの測定結果を比較することにより、彼は、大気と等しい弾性の蒸気の重さは、同じ体積の冷たい水の重さの約 $\frac{1}{1800}$ であることを導いた。

(p.312) 彼の模型のボイラから蒸発した水の量を計ることにより、彼はシリンダに供給される蒸気量を計算できるようになった。それを受けて、彼はボイラを建造し、それから所定時間内にどれだけの蒸気量が蒸発するかを調べ、この水がその体積の 1800 倍の蒸気となることを考慮することにより、彼は、シリンダは毎行程でそれを満たす蒸気の 3 ないし 4 倍の量の蒸気を必要とし、そして残りの量は冷たいシリンダの加熱により引き起こされる凝縮の中で失われることを見出した。

その後、彼は模型のシリンダ内への噴射に要する冷水の量を計り、それにより凝縮された蒸気量と比較しようとした。しかし、蒸気中の水の量に比べて冷水の量が非常に大きいことを見出し、冷たい噴射水が、非常にごくわずかな量の蒸気状態の水から膨大な量の熱を受け取らねばならないことに、彼は大きいショックを受けた。求めた比率に何らかのミスがあるのではないかと疑って、彼は小さい管に蒸気を通して蒸気の熱を直接求める実験を行った。その管は、出口を下方へ曲げて 52 度^{*1}の冷水を入れたガラスの壺に浸されていた。し

*1 (訳注) 温度はすべて華氏。

たがって、蒸気は水の中に混合されて凝縮し、水は蒸気の熱を全て受け取って沸騰する熱さになり、それ以上凝縮させることができなくなった。壺の中の水は、凝縮した蒸気が加わって元の重さの約 $\frac{1}{6}$ 増加したことが分った。これより、蒸気状態の水 1 ポンドが、6 ポンドの水を 52 度から 212 度まで加熱することができることが分った*2。

ワット氏はまた、ある量の水が閉じたダイジェスタの中で沸点より数度上まで熱せられた後、その開口部が開かれた時、蒸気が 3、4 秒以内に非常に激しく噴き出し、残った水の熱が沸点温度まで低下することにも注意を向けている。その蒸気が凝縮されたとすると、その全量はわずかに水 2、3 滴にしかならないであろうが、蒸気状態のこの少量の水は、ダイジェスタの中のすべての水から (沸点以上となっている) 過剰の熱を持ち去ることができるのである。このことより、蒸気には莫大な量の熱が含まれることが明白になった。

これらの状況を友人のブラック博士に告げたとき、その当時にその優秀な哲学者により発見されたばかりの原理について、ワット氏は初めて教えられた。それは、熱は物体と結合することによりその中に眠るまたは隠される場合があり、この隠された熱、つまりブラック博士が呼ぶところの潜熱 (latent heat) は流動性と弾性の原因である、というものであった。

たとえば、開放された容器内で沸騰している水は 212 度の温度となり、それから上がる蒸気も 212 度であるが、その蒸気 1 ポンドは、沸騰している水 1 ポンドよりはるかに多くの熱を含み、960 ポンドの水を 211 度から 212 度まで 1 度加熱するのと同じ程度の熱を持っている。そして、その温度を増やすことなく蒸気に弾性を与えるのは、この大量の内部の火つまり隠れた熱である。従って、212 度で 1 ポンドの蒸気を凝縮して、212 度で 1 ポンドの水にするには、蒸気のすべての潜熱を吸収するだけの冷水が供給されなければならないであろう。

ワット氏は今や、蒸気に関係した主要な事実、すなわちその対応する温度、弾性、重さおよび潜熱を熟知するようになり、機関の性能に影響を及ぼしているすべての状況について、推論できるようになっていた。そして、一定量の蒸気に大量の熱が含まれるのであれば、機関の改良には、これまでの努力の主な対象であったボイラと炉の建造よりも、蒸気の経済的な使用がより重要であることが明らかになった。蒸気の応用は、1719 年に バイトン氏により最初に解決された後、怠られてきた。"Philosophical Transactions" や特許省に記録されたこれらの改良のプロジェクトは、蒸気機関の理論の理解がいかに極めて不完全であったかを示している。

(p.313) バイトン氏は蒸気が大量の熱を持つ事実を 1719 年に気づいていたことは、注目に値する。彼は次のように言っている。「機関の直径 32 インチのシリンダから毎行程で 1 ガロンの水が出て来るが、約 3 立方インチの水から作られた蒸気が、いかにして 1 ガロン*3もの冷水を加熱して、火傷するほどに熱くして出すのかは驚くべきである。ピストンが下へ来た時、シリンダと全ての部品はわずかに温かいだけである」(Desaguliers' Exper. Phil, vol. ii.)。バイトン の時代、この状況の説明を行えるほど十分に科学は進歩していなかったが、ワット氏はこの真実を目の当たりにして、彼の発明の才能を発揮するために新しいフィールドへ踏み込んで行った。

構想 今やワット氏は、蒸気を最善に使用するには、全ての場合でシリンダを蒸気自身と同程度に熱く、つまり約 212 度に維持されるべきであり、また、蒸気を効率よく凝縮するには、その中の水は少なくとも 100 度まで、できればそれ以下にまで冷却されるべきである、との結論に達した。そのような完全な加熱や冷却は同じ容器内で実施できないことは明白であったが、これらの条件を満たす方法は直ぐには見つからなかった。

*2 (訳注) つまり、この実験による大気圧の水の蒸発潜熱は $6 \times (212 - 52) \text{ Btu/lb} = 960.0 \text{ Btu/lb} (= 533.0 \text{ kcal/kg})$ となる。ちなみに、真の値は $2256.9 \text{ kJ/kg} = 970.94 \text{ Btu/lb} (= 539.05 \text{ kcal/kg})$ である。

*3 (訳注) 1 ガロン = 277.42 立方インチ

ワット氏がシリンダとは別の容器で凝縮するとの偉大な発明を行ったのは、翌年の 1765 年になってからであった。そのとき彼は、後年コンデンサと呼ばれることになる容器を配管でシリンダと連結して、シリンダと同時に蒸気で満たしておき、そのうえでそのコンデンサの中へ水噴射を行えば、その中の蒸気を凝縮して真空を生じるであろうと考えた。これらの状況下では、シリンダ内の蒸気の弾性は平衡を回復するためにその蒸気をコンデンサ内へ流出させるであろう。そして、噴射を続けることによりこの蒸気はコンデンサに入るとすぐに凝縮し、まだ続いている真空によりシリンダから残りの蒸気を何も残らなくなるまで引き出すであろう。この方法によりシリンダの温度を沸点以下に下げることなく、シリンダ内に真空が作り出されるであろう。ピストンを降下させるためにこのように真空を得た後、シリンダとコンデンサの連結を絶ってボイラからの蒸気を新たに供給することにより、引き続いてピストンを再度上昇させることができるであろう。コンデンサ内へボイラから新たな蒸気を受け入れることは、まったく必要でなかった。なぜなら、コンデンサの中で作られた真空はなおも維持されており、ピストンがシリンダの最上位置に到達すると直ぐに、シリンダから蒸気を受け入れて凝縮し、次の行程を行なう準備が既にできているからである。

この配置により常に一定の真空つまり空洞の空間を作ることができ、シリンダと連結されればいつでも蒸気を受け入れてシリンダを空にすることができたであろう。このことは一方では、ボイラは常に一定のプレナムとなっていること、つまり蒸気の供給源として維持されていて、シリンダと連結されれば何時でもそれを蒸気で満たすことができることと同様である。

推論のこの美しい連鎖を遮った最初の困難は、噴射水が分離コンデンサに充満するのを防いで動作を継続する方法、および空気を除去する方法であった。ニューコメン機関と同じ方法でコンデンサの中へ蒸気を噴き出すと、彼の全発見により節減できたはずの蒸気が凝縮して大量の浪費が生じてしまうであろう。そこで、水を噴射するのではなく、セイヴァリの最初の案のように、単にコンデンサの外側に冷水を供給することにより凝縮させることを考えた。蒸気の凝縮により作られる少量の水を除去するために、コンデンサから下方へ深さ 34 フィートの排水管を繋げば、その配水管の下端から水がそれ自身の重力により流出するであろうと彼は考えた。しかし、蒸気により運ばれてコンデンサの中に次第に蓄積される空気は、簡単には除去できなかった。そのため、空気を抜き出してコンデンサを空に維持するために、小型のポンプを使用する必要があった。そして、このポンプは大レバーで動作させることができた。

(p.314) もう一つの困難は、ピストンを気密に保つことであった。古い機関ではピストンの上に常に水が張られ、もし下のシリンダの中へ何らかの漏れが生じてもほとんど障害にならなかった。なぜなら、その水は新鮮な水ほど冷たくはなかったけれども、噴射水の補助になったからである。しかし、新しい方法では、何らかの水が高温のシリンダ内に入ったならば、蒸気に変化して真空を損なうであろうし、シリンダをも冷やすであろう。改良の核心は、シリンダが常に乾いた熱い状態になるように、そこからすべての水を取り除くことであった。そのため、ピストンの気密を保つために、水の代わりにワックス、油および獣脂を使用することにした。

彼に生じた次の問題は、ピストンが熱いシリンダの中へ押し下げられるたびに、その中へ入って来る大気圧の空気が (ピストンの上方となった) シリンダの内側を冷やし、損失を引き起こすことであった。これに対する最も明瞭な解決策は、機関室自体を非常に狭くして熱を閉じ込め、その中の空気を乾燥ストーブのように熱くすることであった。

更に熟考すると、機関室が空気に代わって蒸気で満たされると考えると、蒸気も同様にうまくピストンを押し下げて、熱い空気よりもより良いであろうと思われた。なぜなら、シリンダの中に何らかの漏れが生じたとしても、それは何の害も及ぼさないからである。彼はここまで進んで、シリンダを熱い蒸気で満たされた容器で囲むだけで、その効果は達成できであろうと気づいた。外部の空気とは全く関係なく、蒸気自身の大気を持

つことになる。この容器はその中のシリンダより少し大きいだけで十分であり、容器の上に取り付けたカバーの中央にピストンの柄を通す穴を開ける。その柄は平滑にかつ正確に穴に合うように作り、周囲に麻 (hemp) を詰めることにより、ピストンの動きを妨げることなく気密にすることができるであろう。

この方法により、シリンダとピストンを内外両側から常に熱く保持するという利点を維持できた。ワット氏はまた、ピストンを降下させる際に、大気の圧力の代わりに蒸気の弾性力、つまり膨張力を用いることは、その強さをより制御しやすくするので、その点でも非常に有利であろうと予見した。なぜなら、シリンダを取り囲んでいる蒸気の熱を増減することにより、その弾性を自由に調整することができるからであり、必要に応じてより大きい、またはより小さい力でピストンを押すことができるであろう。したがって、新しい機関のパワーは完全にその運転員の管理下になり、また、大気圧の空気の重さのあらゆる変化から全く独立するであろう。

今や、発明の原理は作り出され、それを有効にするメカニズムの詳細を考え出して、各 부품の必要な比率を実験により求めることだけが残された。ワット氏自身は、次のように言っている。「分離コンデンサの考えが一度始まると、これらすべての改良は当然の結果として矢継ぎ早に続いた。そのため、一両日の間にその発明は私の心の中でこのように完成したものとなった。」

試作 (p.315) これらの新しい考えに基づく最初の実験は、分離コンデンサの効果を試してみることであった。しかし、実験のための装置を作るのに先立って、彼は水噴射を用いずに外部からの冷却により蒸気を凝縮することと、空気を吸引するのと同じポンプを用いてコンデンサから凝縮水を吸引することとを解決した。

直径 $1\frac{3}{4}$ インチで長さ 10 インチの小さい真ちゅうのシリンダに、ブリキ板製のカバーと底とが取り付けられた。装置を簡単にするために、彼はこのシリンダを上下逆向きにして動作させた。小さいボイラから蒸気を運ぶ配管がシリンダの下端に繋がれていて、その同じ配管から別の分岐管が分かれてシリンダの上端に繋がりが、またその上端から蒸気を排出するための排気管が新しい凝縮装置へ繋がれていた。ピストンロッドの中心に長手方向に上に向かって穴が開けられ、シリンダを最初に満たす蒸気が凝縮してできる水を排出するために、その下端に弁が取り付けられた。この時に使われたコンデンサは直径約 $\frac{1}{6}$ インチ、長さ 10 インチまたは 12 インチの薄いブリキ製の 2 本の管で構成されていて、鉛直に立てられてその上端はより大きい直径の短い水平の管に繋がりが、その水平管の上側に開口部があり外部へ開く弁で閉じられていた。これらの鉛直の配管は、底の部分で別の直径 1 インチの鉛直の配管と繋がっていて、その鉛直管はピストンが取り付けられて、手動の空気および水のポンプとして機能した。これらの凝縮管と空気ポンプは、冷水で満たされた小さい水槽の中に入れられた。蒸気は小型のボイラから供給され、蒸気管により常時シリンダの底へ送られ、また時折、分岐管のコックを通じてシリンダの上部へ入れることもできた。また、排気管も蒸気が通過するのを遮るためのコックを備えていた。

最初に、両方のコックが開かれて蒸気が入り、中空のピストンロッドを通じてシリンダから空気を追い出し、また外部弁を通じてコンデンサから空気を追い出した。空気がすべて排出されて全装置が熱い蒸気で満たされた時、排気コックと蒸気コックが閉じられ、コンデンサの中に真空を作り出すために空気ポンプのピストンが引き上げられ、外部から冷却することにより内部の蒸気が凝縮された。そして、排気コックが開かれると、直ちにシリンダ上部の蒸気が真空のコンデンサへ流出し、その周りを囲む冷水により凝縮された。その真空はなおも継続するので、シリンダの頂部からすべての蒸気が排出された。しかし、シリンダの下部にボイラから自由に蒸気が入り、ピストンロッドの下端に 18 ポンドの重さが吊るされていたにもかかわらず、ピストンを上方へ押し上げた。その後、排気コックが閉じられて蒸気コックが開かれると、シリンダの頂部に蒸気が供給されてピストンが下がった。そして、蒸気コックが閉じられて、排気コックが開かれた。この操作が、必

要な回数だけ繰り返された。所定の数の行程を行うのに消費された蒸気の量は、ボイラで蒸発する水の量から求められ、ピストンで持ち上げることのできる重さが計測された。その発明は蒸気の節約量を見ている限りでは、完全であることが分かった。

そして次に、シリンダを外シリンダつまり蒸気ケースで囲んだ大きい模型が作られ、それを用いて実験が行なわれ、独創的な発明家の予想を完全に確証し、新しい方法の優位性を疑いないものにした。ピストンで持ち上げられた重さより、シリンダ内の真空はほとんど完全であることが示された。また彼は、長時間の沸騰により空気を追い出したボイラ水を用いた時、持ち上げられる重さは、ピストンの上の大気的全圧力よりさほど劣っていないことを見出した。このことは、大きい発見であった。なぜなら、古い機関では熱せられた噴射水から昇る蒸気の弾性が大気圧の $\frac{1}{4}$ 以下になることはなく、したがって、機関のパワーの $\frac{1}{4}$ を除外していたからである。

(p.316) この 2 番目の模型ではシリンダは普通の向きに置かれ、旧来の機関で採用されていた作業レバーや他の全ての装置が使用された。初回の試行でシリンダを上下逆向きに配置したことは、新しい原理を試すための単なる便宜上のものであったが、実際の機関であれば多くの障害に見舞われたであろう*4。

1.2 ワット氏の最初の特許、1769

ワット氏は、1768 年まで彼の最初の特許を申請しなかった。その特許は 1769 年 1 月 5 日の日付となっており、火の機関において蒸気と燃料の消費を少なくする方法に関する彼の新しい発明に関するものである。その仕様は以下のとおりである。

「火の機関において、蒸気の消費したがって燃料の消費を少なくする私の方法は、以下の原理から構成される。

第一：機関を動作させるために蒸気のパワーを取り出す容器は、一般の火の機関ではシリンダと呼ばれ、私はそれを蒸気容器 (steam-bessel) と呼んでいるが、その蒸気容器は、機関が動作する全時間にわたって、そこへ入る蒸気と同程度に熱い状態に維持されていなければならない。そのためには、(1) 熱をゆっくり伝える木または他の材料で容器を包むこと、(2) 蒸気または他の熱い物質で容器を取り囲むこと、(3) 蒸気よりも冷たい水や他の物質がその中へ入ったり接触したりしないようにすること、が必要である。

第二：全てまたは部分的に蒸気の凝縮により動作する機関では、その蒸気は、蒸気容器つまりシリンダに間欠的に連結される別の容器内で凝縮するようにされる。この容器を私はコンデンサと呼び、機関が動作している間、このコンデンサは水または他の冷たい物体を当てがうことにより、少なくとも機関周囲の空気と同程度に冷たくしておく必要がある。

第三：何らかの空気または他の弾性蒸気はコンデンサを冷却しても凝縮されず、機関の動作を妨げるであろう。それらは、機関自身または他の方法で動かされるポンプを用いて、蒸気容器またはコンデンサから抜き出されなければならない。

第四：私は多くの場合、今日一般の火の機関で大気の高圧を用いてピストンを押しているのと同じ方法で、蒸気の膨張力またはその代わりに使用できる何らかのものを使う考えである。豊富な冷水が得られない場合は、蒸気が仕事をし終わった後、それを大気中へ排出することにより、機関を蒸気のみで動作させることもできるかも知れない。

*4 1824 年にロンドンで、ボルトン氏とワット氏は、ワット氏の最初の模型の案による大きい機関を作った。

注意：このことは、揚水される水が蒸気容器自身またはそれに直接つながる容器に流入する種類の機関^{*5}にも、拡張されると理解されてはならない。

第五：軸まわりの回転運動が必要とされる所では、私は蒸気容器を中空リングつまり円形流路の形に作り、適当な蒸気の入出口を付けて、水車の車輪のように水平軸に取り付ける。その中に多数の弁を置いて、全ての物質が流路を一方向へ回るようにする。この蒸気容器の中に複数の重りを配置し、流路の一部を完全に塞いで、かつ流路内を下記のように自由に動けるようにする。つまり、蒸気がこれらの重りと弁との間でこれらの機関に入るとき、両者に等しく作用して重りを車輪の一方側へ持ち上げ、そして弁への継続的な反動力により車輪に回転運動を与える。弁は重りが押されている方向へ開くが逆方向へは開かない。回転する蒸気容器として、それはボイラから蒸気を供給されて、その役割をし終えた蒸気はコンデンサによるかまたは開放空気中へ排出される^{*6}。

(p.317) 第六：蒸気を水にならない程度に冷やすことにより、かなり収縮させることができ、ある場合には、それにより蒸気の膨張と収縮を交互の繰り返しで機関を動作させることを、私は意図している。

最後に：ピストンや機関の他の部品の空気および蒸気に対する気密を確保するために、水を用いる代わりに、私は油、ワックス、樹脂状物質、獣脂、水銀またはその他の液状金属を使用する。」

この仕様を作る際に、ワット氏は大きいスケールでは試験していなかった機器の特徴を定義しなければならなかった。彼は自身の発明の価値と推論の正しさを確信するのに十分な数の実験を試みてはいたが、その仕様を表現している概括的な用語から判断して、彼の計画の重要な部分で全く完全であったというわけではなく、彼の原理に基づく最良の形の機関構成を決定できていなかったように見える。そのために、彼の特許は単に蒸気の消費を少なくするためだけであり、彼はそのための機械つまり機関の形を描写しているのではなく、(1) シリンダは蒸気と同程度に熱く保たれねばならないこと、(2) 蒸気はシリンダとは別の容器で凝縮されねばならないこと、(3) 空気はそこからポンプで排出されねばならないこと、(4) ピストンを押すのに大気の圧力の代わりに蒸気を用いられねばならないこと、等々を一般的に指示しているのである。

ワット氏が彼の原理を開発して多くの機関を製造し、それを用いて大きい利益をもたらした後、彼の特許を回避できることを予想していくつかの模倣品が作られた。しかし、たとえそれらの見せかけがどうであったとしても、仕様の非常に概括的な用語のせいでワット氏は彼の敵を撃退することができた。その後特許の期限が切れたとき、彼の仕様書は、有能な作業者がその機関を建造できるような簡単な説明書を含んでいなかったという理由で、彼は攻撃された。この特許以上に法廷で厳しい試練を受けた特許はかつてなかったが、特許所有者にとって幸いにも、それはすべての攻撃に耐えることができた。

機関の実現 特許を取得した頃、ワット氏は、スコットランドでキャロン鉄工所を創設したローバック博士と協力関係を持っていた。彼らはその特許の下でそのような機関を作る広大な製造所を設立することを企画し、ワット氏は、キネイルハウスでシリンダ直径 18 インチの最初の実際の機関の製作を開始した。それは一種の実験的な機関であって、ある程度に完成するまでに繰り返し変更され改良された。

その構造の詳細で最大の困難は、蒸気に対して気密となるようにピストンにパッキンを取り付ける際に生じた。なぜなら、ワット氏の原理では、旧来の機関のように漏れを防ぐためにピストンの上に水を保持することができなくなったからである。そのため、彼は、シリンダを極めて精密に完全に円筒形に中ぐりして、精細に研磨しなければならなかった。そして、彼はピストンのパッキンに多くのさまざまな柔軟物質を試行した。大き

*5 (訳注) これはセイヴァリ機関を念頭に置いていると考えられる。

*6 (訳注) この項、詳細不明。

い摩擦が無くかつ気密を保ち、完全に乾いて沸騰水と同程度に熱い状態でも機能するような物質を探した。

彼の最初の試行では、十分に正確なシリンダを手に入れるのは非常に困難であった。当時、シリンダを中ぐりするための全く新しいシステムが無ければ、新しい機関のために大きいシリンダを作ることを期待するのは、ほとんど絶望的に見えた。なぜなら、シリンダの内面に環状や不規則な凹凸があると、水分を含まないパッキンは摩擦により直ぐに破損して、漏れを引き起こした。

ワット氏の発明の進展にとって幸いなことに、彼の機関の性能はピストンの気密が少し不足しても大きくは減少しない。大気圧機関ではある量の空気が入ると、それは動作を妨げた。しかし新しい機関では、ピストンが降下する間にかなりの量の蒸気がピストンを通して入ってきても、凝縮が迅速であるので圧力の減衰（つまり上昇）はほとんど観察されることがなく、蒸気の無駄による燃料の損失だけが、唯一の不具合となる。

(p.318) 結局、彼ができたことは、シリンダとそこへ入るピストンとののはめ合いの欠陥により、ピストンが降下する間にその側面を通してかなりの蒸気が逃げるのを許容することであった。もしそうせずに、ピストンの麻のパッキンを非常にきつく押し付けたならば、シリンダの内側に対する摩擦が増加して蒸気の節減を上回ってしまったであろう。

シリンダのカバーと、そこを貫通して麻のカラー内を滑るピストンロッドとののはめ合いは、この蒸気機関における新しい装置であり、それを効果的に行うには極めて高度な技術を必要とした。ニューコメン機関ではピストンロッドは粗い四角形であり、強度以外の他の特性は必要とされなかった。そして、ピストンは、二股または必要に応じて四股のフォークによりロッドに固定することができた、しかしワット氏は、シリンダ自身と同じ精度で、ピストンロッドを平滑に、真直に、かつ円筒形に作らねばならなかった。そして、それは正確にピストンの中心に、かつシリンダ中心軸上に固定されることが必要であった。最初の事例では、ロッドが貫通するシリンダのカバーの中のソケットつまりパッキンボックスも同様に困難であった。

ワット氏が彼の進展を妨げた障害と戦っていた間、ローバック博士は、ボロースタウンネス (Borrowstowness) 石炭・製塩所の事業での失敗から資金繰りに困り、予定していた蒸気機関の製造を遂行することができなくなった。そのために、1773年にローバック博士は、ワット氏の特許に対する権利をマシュー・ボルトン (Matthew Boulton) 氏に譲り渡した。ボルトン氏がパーミンガム近郊のソーホー (Soho) で設立した会社は、すでにイングランドの金属加工の最も完全な製造所となっており、最も精力的に活動していた。その会社の一部がワット氏に割り当てられ、ワット氏は間もなく、自身の発明を大規模に実現するのに必要な鋳造所と工場を立ち上げた。

大きい時間ロスと機関を完成するのに必要な経費のために、ワット氏は1774年まで、彼の発明のサンプルとしての大きい機関を製造できなかった。そして、それを紹介することの難しさから、彼の出費を回収して彼の発明に相応の利益を得る前に、彼の特許の14年の期間が経過してしまう恐れがあることがわかった。そのために彼は、議会に対して彼の特許の期間の延長を申請した。彼の発明の真のメリットと、その実用化のために彼が行なった努力との両方に関して、ローバック博士、ボルトン氏、その他の人々の証言による支持を受けて、1775年に法令が通過し、元の14年の特許が、その日付から25年間有効、つまり全体として特許は30年以上有効であることになった*7。

*7 ワット氏の発明に対してなされた評価は、以下に示すこの法令の前文からの抜粋の中に最もよく表されているであろう。

「技術者ジェームズ・ワット、彼の執行者、管理者および受託者に、彼の発明による通常火の機関と呼ばれる特定の蒸気機関の独占的使用と所有の権利を、彼の陛下の領土全体を通じて限られた期間において与えるための法令。

前記のジェームズ・ワットは長い年月と彼の運勢のかなりの部分を、一般的に火の機関と呼ばれている蒸気機関に関して、これらの非常に有用な機械を改良する目的で実験を行うことに捧げ、これにより、普通の蒸気機関に比べていくつかの非常に重要な利点が取得されている。しかしながら、常にこのような大規模かつ複雑な機械の実現に際して発生する多くの困難と、必要な試験を

(p.319) ワット氏に彼の労力に対する報酬を補償したこの激励を受けて、彼は直ちにボルトン氏との合名会社 (partnership) を立ち上げた。そして、ボルトンとワットの両氏は、バーミンガムの近郊、ソーホーのスメジック (Smethwick) で、1800 年に特許が最終的に失効するまで、大成功裏に特許蒸気機関の製造を続けた^{*8}。

その種のものとして当時唯一のものであったこの会社は、それは国富の真の源泉であることを証明し、同時に、特許の所有者に対し独立した財産を実現するものであることを証明した。

ワット氏は彼の新しい協力者により管理部門の仕事や、家庭用部品製造という他の部門での作業者の訓練も任されていた。その一方で、ワット氏は主に鉱山などで機関が必要とされている場所を訪問し、各ケースごとに適した案を作成し、その後機関を建造して動作させる任務にも当たっていた。

ソーホーには、特許機関の管理と運転について本式に教育された労働者の部隊があり、新しい機関が建造されるとそれと共に、これらの人々の一人が送り出され、他の者がその業務をきちんと教育されるまで、機関を正常に動作させて維持管理に当たった。

このように助けられ、励まされ、支持されて、ワット氏は急速に進展した。1778 年までに彼は、スタッフフォードシャー、シュロップシャー、ワーウィックシャーで数台の主力機関を、ロンドン近郊のストラトフォードで 1 台の小さい機関を建造した。

これらの初期の見本は、彼がその後に製造したものと比較して、動作の面で疑いなく非常に不完全であった。しかし、経済的な燃料消費と完全なパワーの発揮は、それらすべての機関で十分に達成された。

ワット氏は当初の機関では、その後彼が実際に導入したような機関のあらゆる部品の改良を行わず、古い大気圧機関のものと同じ部品を使って、シリンダとその蒸気ケース、またはコンデンサと空気ポンプだけを新しく用いた。蒸気ボイラは古いものの容量の半分だけで済み、蒸気調節弁もまた新しいモデルのものであった^{*9}。

行うのに必要な長い時間とのために、彼は、建造の標本としていくつかの大型機関を仕上げ、前記の発明の有用性を実証することに成功した 1774 年の末まで、彼の意図を完了できなかった。

必要な精度でこれらの機関を製造しそれらが手ごろな価格で販売されるためには、工場や他の装置を建てるのにかなりの額の金銭が事前に費やされなければならず、本発明の有用性及びこれを採用する利益について、国民一般のかかなりの部分が完全に確信できるまでに、数年の年数と実証の繰り返しが必要とされるであろう。そのために、前記の特許証によって付与された全期間は、前記のジェームズ・ワットが彼の労力や発明に見合う利益を受けることができる前に、おそらく経過してしまうであろう。

そして一方で、これまでなされてきたよりもはるかに少ない費用でより便利な形で、力学的パワーを供給することにより、この王国の多くの偉大な仕事と工場生産の中で、彼の機関は操作を促進するなかで非常に有用となるであろう。しかし、彼の発明を彼が望むような完全な形に実現して、それを使うことのできる国民に最高の実利と同等のものを与えることは、前記の特許証によって付与された期間が延長されて、前記の発明における彼の財産が、彼の労力、時間、および費用に対する十分な報酬を彼にもたらすような期間、保証されることがない限り、前記のジェームズ・ワットの力の及ぶ所ではないであろう。

最後に、それゆえ、前記のジェームズ・ワットは、彼の前記の発明を遂行して完成することを可能とされるよう奨励される。それに由来するすべての利益を、その最大範囲で国民が享受できるように、以下のように制定される。

この法令の通過以降、本明細書で特に既述された前記の機関を製作し建造し販売する独占的特権と利益は、グレートブリテン王国と彼の陛下の植民地および海外植林地内において、25 年の期間中において、前記のジェームズ・ワット、彼の執行者、管理者および受託者に帰属すべきであり、ここで宣言される。」等々。

この法令は 1775 年に可決された。

^{*8} ボルトン氏が死去して数年後、74 歳の高齢となっていたワット氏は、彼の元協力者について次のように書いた。

「1775 年に始まった私たちの協力関係は、独占的な特権と共に、私がビジネスを引退した 1800 年に終わったが、私たちの友好関係は彼の人生の終わりまで減じなかった。その友好の記念として、おそらく最後となるこの公的機会を利用して、一言述べる。たとえ私の努力の結果としてどんな成功が生じたとしても、それは多分に、彼の親密な励まし、科学的な改良とアート・プロセスへの手早い応用に関する彼の卓見、ビジネスと製造についての彼の深い知識、および、事業についての彼の広い視野と自由な精神、の賜物である。」"Mr. Watt's Annotations on Dr. Robison's article Steam-Engine", 1814 を参照。

ボルトン氏は、1809 年に 81 歳で死去した。

^{*9} ワット氏とスミートン氏は親交を続け、時折書簡を交わし続けた。その中で、ワット氏は彼の発明の進捗を伝えていた。1776 年 4 月のこれらの手紙の一つで、ワット氏は以下のような不満を打ち明けた。

(p.320) キネイルでの彼の最初の試みでは、ワット氏は古い機関の蒸気調整器のようなコックおよびすべり弁を採用したが、短時間使用するとそれらは常に漏れるようになることが分った。常にそれらが完全に乾いていて、絶えず非常に熱くなっていることを考えると、これは驚くべきことではない。そのため彼は、それら全てを(スピンドル弁に)取り替えなければならなかった。なぜなら、最初に正しく研磨されてうまく合っていたスピンドル弁は、それほど調子が悪くなりやすいとは思われなかったからである。当時、ボイラの安全弁を除いて、スピンドル弁は蒸気機関への新しい適用であった。それらはプペット弁 (puppet clack) またはボタン弁 (button valve) とも呼ばれていた。

スピンドル弁はベルメタルの平らな円板であり、丸い鉄の軸がその中心を貫通して上と下へ突き出ている。この弁は、開閉する流路となる円形の弁座または開口部に非常に正確に合うように研磨され、端が円錐形になった弁体がこれも円錐形の弁座の開口部に栓のように合って、弁が下りたときには流露を完全に止めることになる。しかし、弁がその弁座から上へ上げられると、その全周囲に自由な通路ができる。弁のスピンドルは開口部の上と下の二つのソケットで支持されて、正確に垂直な方向に保持されて、正確にその位置に落ちるようにされている。

1.3 ワット氏の最初の蒸気機関、1775 ~ 1778

(p.321) ワット氏の最初期の機関のひとつのシリンダ断面図を図 1 に示す。これはブリタニカ大百科事典の第二版の不完全なスケッチから作られたものであるが、その機関は Plate II (巻末図) で示すニューコメン機

「私は、気がかりな心の活動から生じた非常に悪い健康状態に悩まされてきた。あらゆるものをサイコロ賭博 (cast of a die ; 訳注：鋳型鋳造と掛けている) に賭けたことの自然の結果である。なぜなら、その光の中で私は、繰り返された成功の認可を受けなかったあらゆるプロジェクトを見るからである。

最近、私は機関、特にコンデンサでかなりの変更を行なった。最初使用したものは、悪質な水からの付着物により損傷し易く、そのため、私たちは噴射により動作するものに置き換えた。この考えを実行する際に、私は数種類のものを試して、最後に変更する必要のないものに行き着いた。それは、普通の弁付きバケットで底が閉じられ、ポンプのカバーに空気と水を排出するための弁が付いたジャックヘッドポンプで構成される。シリンダから来る排気管がバケットの上と下でこのポンプに繋がり、ポンプから排気管への流れの逆流を防ぐために、複数の弁が付いている。バケットはそれ自身の重さで下がり、大レバーの外側の端に吊るされた大ピストンが下がる時機関により上げられる。このポンプの上の部分と排気管内の両方へ噴射がなされ、速さと完全さの点で、私の考えを越えて動作する。

ソーホーの私たち自身の機関の空気ポンプの寸法は、直径 7 インチ、行程長 20 インチであり、真空は 27 ~ 29 インチ水銀柱に等しく、言い換えると、一般に気圧計より約 $1\frac{1}{2}$ インチだけ小さくなる。機関が平方インチあたり 11 ポンド以上の荷重をかけられるとき、蒸気が 1 ~ 3 インチ水銀柱を支えるならば、それは非常にうまく動作する。1 cwt つまり 120 ポンドのウェンズベリー (Wednesbury) 粉炭は、20000 ~ 30000 立方フィートの水を 20 フィート高さへ持ち上げる。そのシリンダは直径 18 インチであり、7.8 立方フィートの水を毎行程 24 フィートの高さへ持ち上げる。

私たちは現在動かせる大きい機関を 2 台有している。1 台はパーミンガムから 10 マイルの場所であり、シリンダは直径 50 インチで、 $14\frac{1}{4}$ インチのポンプ胴を動かして、100 ヤードの深さから揚水することを意図している。しかし、立坑は現在 40 ヤード深さだけであり、それらは多量の水を上げており、機関は休まずに動いている。それらのボイラは直径 $12\frac{1}{2}$ フィートであり、非常に悪く、シリンダは冷たい空気から保温されていない。それらは、古い石炭丘の排炭を 12 時間でわずか 25 cwt だけ燃やす。私はこの機関が動くのを見たことがないので、それについてこれ以上話すことはできない。

もう一つの機関はシリンダ直径 38 インチで、シュロップシャーのニュー・ウィリーで製鉄炉に送風している。それは直径 72 インチ、行程長 7 フィートの送風シリンダで空気を直接圧縮している。そのシリンダは非常に粗く、不揃いに中ぐりされているので、それがどの程度のパワーを出すか確信はないが、水調整器 (water regulator) の空気室内の高さ $5\frac{1}{2}$ フィートの水柱を、毎分 14 行程上げる。つまり、水柱は直径 72 インチの高さ $5\frac{1}{2}$ フィートとなる。私がそこを去ったとき、未完成の問題がいくつかあったが、使用される燃料の量は、非常に少ないようであった。これらの両機関は、十分に理屈っぽい労働者にさえ歓迎されている。私たちは他にいくつかの大きい機関、ワーウィックシャーの直径 58 インチのシリンダのもの、等を進めており、私たちの関心は、ビジネス関係方面に向かっている。

ウィルキンソン氏は、シリンダを中ぐりする技法を改良した。それにより、直径 72 インチのシリンダについて、その真の値からのずれが、最悪の場合でも薄い 6 ペンス硬貨の厚さを超えないと、私は約束できる。私は、調整器を改良しようと努めている。私の計画は、それらを鋭い円錐形の弁にして、重さで閉じて蒸気力で開くことである。それらは成功しそうであり、数日中に試験されるであろう。」

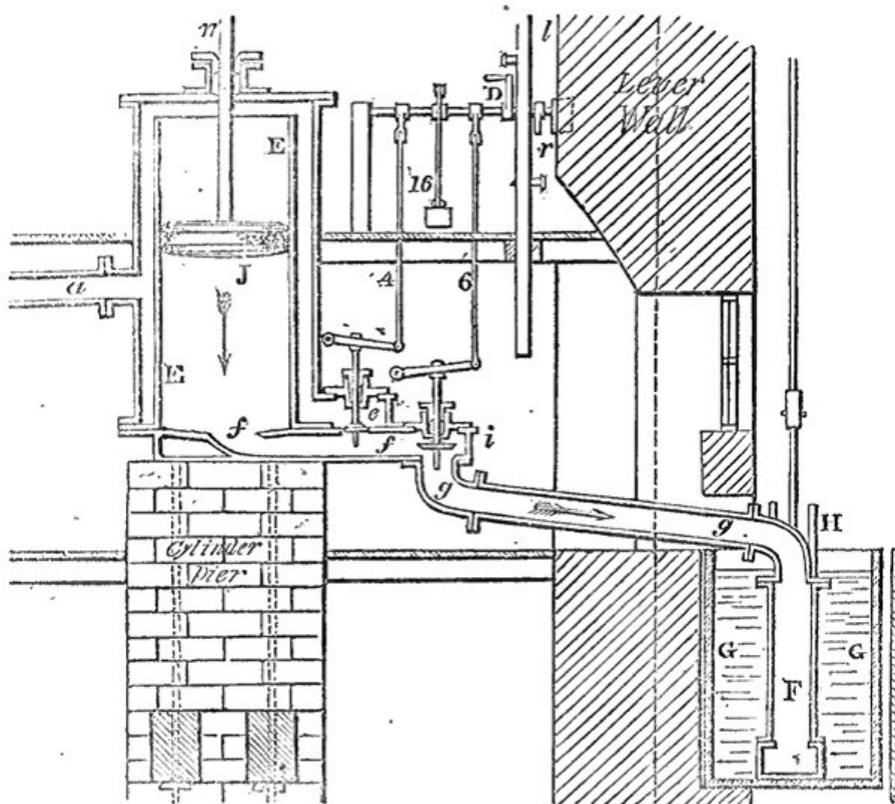


図1 ワット氏による最初期の機関

関を変更したものであると考えられており、その古いシリンダが取り外されて、ワット氏のシステムに基づく新しいものに取り替えられた。

その建屋、大レバーおよび鉱山内のポンプ仕掛けは元のまま残されているが、新しい機関は、古い機関と同じ仕事をするのに半分の蒸気だけ足りるので、新しいシリンダに蒸気を供給するにはサイド・ボイラで十分であり、シリンダの下のボイラは取り外されている。シリンダを吊るすための建屋を横切るはりも取り除かれている。同様に、ジャックヘッドポンプとその上昇管、噴射水水槽とその配管、全ての制御ギアも取り外されている。

ボイラを取り外すことにより残った空間は建屋を横切る強力な壁を築いて埋められ、適当な高さまで積み上げられて新しいシリンダの基礎となっている。シリンダは中央で支えられる代わりに、その底の位置で支えられている。新しいシリンダ E E は以前のものより非常に小さくなり、支える水柱の荷重は 1 平方インチあたり $7\frac{1}{2}$ ポンドに代えて、10 ないし 11 ポンドに等しくなっている。そのシリンダはそれよりかなり大きい蒸気ケースと呼ばれる別のシリンダの内側に入れられ、両者の間の全周にわたって、蒸気を流入するための狭い空間を残している。

実際のシリンダは上部が開放されていて、側面は非常に正確に中ぐりされ、ピストン J がその中へ正確にはめ込まれている。蒸気ケースは円形のカバーで上部が閉じられていて、ピストンロッド n がその中央を貫通している。このロッドは完全に真直で円筒形であり、カバーの中心を通る穴に非常に正確に合う。カバーの上に麻の詰め物つまりパッキングを入れる短い円筒形チューブが取り付けられ、ピストンロッドと円筒形チューブ

ブの内面の間のスペースにパッキンが固く詰め込まれ、ロッドが全周から非常に密接に囲まれて、蒸気が通過するのを防ぐ。麻を保持するためにチューブの頂部にカバーが付けられて、ネジで下向きに固定される。このカバーは、ピストンロッドを通過させるために中央に穴が開けられている。ピストンロッドは、真直で良く研磨されていて、カバーの中央のパッキンボックスを通り、蒸気を逃がすことなく自由に動くことができる。

ボイラからの蒸気は蒸気管 a で運ばれて、蒸気ケースとシリンダの間の空間へ入る。シリンダの上端は上のカバーにまで達していないので全周に渡って隙間があり、蒸気はそこを通過してシリンダの上部分へ入ってピストンを一定の力で押す。したがって、ニューコメン機関のシリンダが大気圧の空気で囲まれるのと同じように、このシリンダは大気圧の蒸気雰囲気の中に入れられていると見なすことができよう。しかし、シリンダ周囲の蒸気の効果は、シリンダの全ての部分を蒸気自身と同じ一定温度に保っており、一切の凝縮を防いでいる。

(p.322) シリンダの下部では、そこに交互に蒸気を出し入れするために通路 f f がシリンダに繋がっている。蒸気は蒸気ケースから蒸気弁または平衡弁と呼ばれる弁 e を通って入り、その平衡弁が開くと、蒸気がピストン J の下へ自由に入ることができ、そして、蒸気はピストンの下面を上面と同じ強さで押すことになる。そのためピストンはつり合い状態に置かれ、つり合い重りの作用により自由に上昇できるようになる。ピストンの下から蒸気が排出される時は、平衡弁 e が閉じられて、排気弁と呼ばれる他の弁 i が開かれなければならない。排気弁が開かれると、シリンダの底にある通路 f と、蒸気が冷やされるコンデンサ F に繋がる排気管 gg との間が繋がる。

コンデンサ F は薄い銅の板でできた密閉容器であり、内面および外面に非常に広い表面積を持つ形状に作られる。それは水槽 G の中の冷水に浸漬され、容器を構成する薄い板を通じて熱が迅速に通過できるので、冷水はコンデンサに入ってくる蒸気から熱を吸収するであろう。コンデンサの形は、時には本のような平らな容器の場合もあり、また、それぞれ冷水に囲まれたこのような容器がいくつか結合された場合もあり、他の例では、F で示すように直立型のシリンダが使われた場合もあった。また、大きい機関ではこのようなシリンダが 4 または 5 本一列に置かれ、その全てを頂部と底部で繋いで外表面積の非常に大きい一つの容器とされた。

コンデンサの中で蒸気の凝縮によって生じた水は、その内面に露となって付着し水滴となって底へ流れ落ちる。この水はコンデンサからポンプ H により引き出される。このポンプは、漏れまたは蒸気と共にコンデンサ内へ入ってきた空気もすべて引き出すことが求められているので、空気ポンプと呼ばれる。空気ポンプ H の構造は、大気圧機関のジャックヘッドポンプまたは噴射ポンプとほとんど同じであり、そのロッドは機関の大レバーから鎖で吊るされる。ポンプの胴は底の部分でコンデンサに繋がり、その間にコンデンサの方へ閉じる弁が介在している。また、ポンプの可動バケットの中にも上方へ開く弁がある。ポンプの動作は、バケットを引き上げるたびに水と空気をコンデンサから抽出することである。バケットが下がる時は、その水および空気がコンデンサの中へ戻るのを下部の弁が防ぐ。このため、空気ポンプの継続的な動作と周囲の冷水による冷却の効果により、コンデンサ内は常に真空状態に維持される。

(p.323) 二つの弁 e と i は、古い機関のものとはほぼ同じ原理で、制御ギアにより交互に開閉される。プラグは 1 にはピンが付いていて、シリンダの上部近くにある水平軸に固定された二つのハンドル D と r を動かす。この軸には 2 本の短いレバーも固定されていて、その 2 本のレバーは、ロッド 4 と 6、弁 e と i のすぐ上の 2 本のレバーを介して、これら二つの弁の直立軸に繋がっており、それらの弁を上下させることにより流路を開閉する。その 2 本の短いレバーは、ハンドル D または r がプラグにより動かされる時はいつでも、一方の弁を開いて他方を閉じ、両方の弁が同時に開くことがないように、水平軸上に固定されている^{*10}。

^{*10} この制御ギアのスケッチは、ワット氏が初期の機関で使ったものを非常に正確に表しているわけではないが、その特性についての理解を与えるのに役立つであろう。実際は、一方の弁を開けるための仕組みは、他方を開けるためのものから全く独立していた。というのは、制御ギアには 2 本の別々の水平軸があり、一方の軸はハンドル D により動かされてロッド 4 により弁 e を動かす、

16 は短いレバーの上端の継手からロッドにより吊られた重りであり、そのレバーは、軸が一方側へ回った時は鉛直線の一方側へ傾いて重りを降下させ、軸が他方の側へ回った時は鉛直線の他方側へ傾いて重りを降下させるように、水平軸の適切な位置に取り付けられている。そのために、重り 16 は、古い機関のタンプリングボブつまりハンマーと同じ効果を生み出す。すなわち、それにより、制御ギアはハンドルにより動かされるのに応じて、いずれか一方の状態で静止することになり、それにより常に一方の弁を開くと共に他方を閉じて保持する。

弁 e と i をその外部から動かすために、それらのスピンドルは弁を入れたボックスのふたを貫通して上方へ出された。そのスピンドルは蒸気または空気の通過を防ぐために、大ピストンロッドのパッキンボックスと同じ方法で、周囲を麻で詰められている。ボックスのふたは、必要なときに外して弁にアクセスできるように作られている。

ワット氏の機関の操作は、以下のとおりである。蒸気がボイラから蒸気管 a を通って蒸気ケースへ絶えず供給されるとすると、それは蒸気ケースとシリンダの間の空間、更にピストンの上のシリンダの上部をも満たす。シリンダとコンデンサは、まず空気を除去されなければならない^{*11}。それは通常、弁 e と i を同時に開いて行われ、蒸気は、蒸気ケースから弁 e を通り、そして流路 f から他方の弁 i を通って、排気管 g g からコンデンサ F の中へ入る。含まれている空気を空気ポンプの弁を通じてそこから排出するためには、これらの流路に蒸気を迅速に流して、コンデンサを通して強制的に噴き出すことができるように、ボイラで十分な蒸気が蓄えられていなければならない^{*12}。機関の全ての部分からすべての空気が排出されるまで、ブロースルーと呼ばれるこの操作が続けられなければならない。その後、弁 e と i が閉じられて、ボイラから蒸気ケースを通してコンデンサへ至る蒸気の大きい直接的な流路が塞がれると、コンデンサ外側の冷水が内部の蒸気の熱を絶えず吸収して、その全てを非常に急速に凝縮し、コンデンサの中と配管 g の中を真空にする。この段階で、シリンダ E はピストンの上下双方とも蒸気ケースからの蒸気で満たされ、上下の圧力が等しいためにピストンは平衡の状態となる。

(p.324) 機関を動かすために、ハンドル r を持ち上げて、平衡弁は閉じたままで排気弁 i が開く位置へ制御ギアを回転する。すると蒸気は、自身の弾性によりシリンダから流路 f を通って配管 g の中へ、さらにコンデンサの真空の空間へ激しく流出する。しかし、その容器の冷たい内面と接触することにより、蒸気はその熱を奪われ、温かい水滴となってコンデンサの底へ滴り落ちる。コンデンサは入って来るすべての蒸気が凝縮されて元の真空が維持されるために、このように流入する蒸気により完全に満たされることはない。結果として、シリンダの下部の蒸気はコンデンサへ流出し続けて何もなくなり、ピストンの下はコンデンサの中と同じ真空になる。この排気は弁 i が開くとほぼ同時にもたらされ、シリンダの上部を占めてピストンを絶えず下方へ押ししている蒸気の弾性力は、その下の少量の蒸気が上へ押す圧力では打ち消すことができず、つり合いが破壊されて、結果として、上面に作用している蒸気によりピストンはシリンダの中を押し下げられる。同時に、大レ

他方の軸はハンドル r により動かされてロッド 6 により弁 i を動かした。

二つの弁を独立に動かした目的は、機関を停止しようとする際に、一度に両方の弁を閉じる便宜のためであり、また、機関を始動する準備として各部分から空気を排除する際に、両方の弁を一度に開くためであった。しかし、通常の運転時では、上述のように二つの弁の動作は瞬間的、相互的、交互的であり、この制御ギアの二重のメカニズムは、スケッチのように一本の軸で動作しているかのように動作する。

*11 ワット氏の最初の機関では、より小さい空気ポンプがコンデンサに繋がっていて、空気を排出するために、人力でレバーつまりハンドルを動かして、機関を始動するための真空を得るようになっていた。その後、上述のように蒸気のブロースルー (blow through) により、空気が容易に排出できることが分かり、手動ポンプで排出する手数が不要となった。

*12 ブロースルーの際に、空気ポンプの弁を持ち上げるのに必要な抵抗よりも、より少ない抵抗で空気と蒸気を逃がすために、コンデンサにブロー弁 (blow valve) と呼ばれている 1 個の小さい弁が追加された。それはコンデンサから外側へ向かって開き、その動作は大気圧機関の漏らし弁の動作に極めて類似しているが、それは機関を始動するために最初に使われるだけである。

バーがポンプ内の水柱を持ち上げ、また空気ポンプのバケットを引き上げる。ピストンがその行程の底に達する時、プラグのピンがハンドル D を下へ押し、排気弁 i を閉じて同時に平衡弁 e を開く位置へ制御ギアを回す。それにより、蒸気ケースからの蒸気はピストンの下のシリンダ内へ入り、常にその上側に作用している蒸気の力を打ち消す。その結果、圧力のつり合いが再度達成され、ピストンは自由になって、つり合い重りで引き上げられてシリンダの最上位置に達し、ピストンが上がるのと同じ速さでシリンダは蒸気で満たされる。その後、二つの弁の位置は制御ギアにより逆にされ、ピストンの下の蒸気がコンデンサの中へ排出されて次の行程が始まる。

このように動作は継続され、コンデンサの中で蒸気が凝縮してたまったすべての水と、更には沸騰の際に水から放出された空気または漏洩により入って来た空気とを、行程ごとに空気ポンプのバケットで引き上げる。

いくつかの技術的問題　ワット氏の最初の機関のいくつかは、この形で建造された。また、いくらかの場合では大気圧機関がこのプランの機関に変更され、その際には、古い機関のシリンダを逆向きにして、新しい機関の外側シリンダつまり蒸気ケースとして使用された。同じ効果を生み出すには、新しい機関の実際のシリンダは、古いものの半分少々ほどの大きさしか必要としなかったのである。

(p.325) 最初のすべての機関では、凝縮はコンデンサを囲む水による外部からの冷却により実行された。しかし、その後の機関では、ワット氏はこの方式はその動作速度が十分に速くないことを見出し、また、コンデンサ中へ毎行程冷水を少量噴射し、さらに凝縮水と空気と共に噴射水も吸引するために十分な大きさの空気ポンプを採用すれば、より良い効果が得られることを見出した。冷水噴射により機関の動作は非常に改良され、大きくされた空気ポンプを動かすのに要する追加のパワーに対しても、十分な余裕を生じた。

排気管内に水噴射して蒸気を凝縮するという考えは、他の種類のコンデンサと同様に早い時期にワット氏の心に浮かび、キネイルでの最初の機関で試みられた。しかし、漏れと不完全な技術のためにその機関は劣悪な真空しか得られず、それは噴射水と共に持ち込まれた空気に起因しているとされた。ワット氏はコンデンサへの冷水噴射の使用を取りやめ、大きい機関用の管式コンデンサが大型で高価となるため、便宜的に機関のパワーの一部を犠牲にして、より大きい空気ポンプを採用することにしていた。なぜなら、大きい機関の蒸気を凝縮するためには、管式のコンデンサは十分な表面積を持たねばならず、極めて容積の大きいものとなるであろうし、また、機関にしばしば供給される劣悪な水がコンデンサチューブの外面にスケールを生じて、その材料を厚くして必要な熱の迅速な通過を妨げるであろう、と彼は考えたからである。

コベントリー (Coventry) 近郊のベッドワース (Bedworth) の機関では、3 台の空気ポンプが使われた。下段の 2 台は横に並べて置かれて大レバーの両側からの鎖で動かされ、また、第 3 の空気ポンプはこれらの上で両者の間の中央に置かれた。この第 3 のものは、他の 2 台により上げられた温水を受け取り、大気の圧力にさらされる表面を少なくすることにより、より容易に水を引き上げた。1778 年に、ワット氏は最大の機関に対して 2 台だけの空気ポンプを採用し、その一方の胴面積を他方の 2 倍とした。そして、その後の機関では 1 台だけの空気ポンプを使用し、それ以降はそのプランが継続された。実際、それはスミートンの空気ポンプであり、胴にカバーつまり密閉した蓋が取り付けられ、大気圧の空気がバケットを押すのを防いで、動作をより容易にしている。

噴射水はコンデンサを囲んでいる冷水から短い管によりコンデンサ内へ入れられ、その管は小さい弁を用いて止められ、その弁は機関が行程を行うごとにプラグにより開かれた。その管には噴射される冷水の量を調節するためのコックも付けられていて、空気ポンプで引き上げられる温水が血液の温度、つまり華氏の 96 度まで下がるように、このコックが開かれた。これは機関が良好な調子の時であったが、それはどんな場合でも決して 110 度を超えることはなく、平均して約 102 度であったと思われる。ワット氏の初期のほとんどの機

関では、凝縮水槽 G はレバー壁と主立坑の間の屋外に置かれた。そして空気ポンプは、古い機関のジャックヘッドポンプまたは噴射ポンプと同じ位置で、大レバーの外端から吊るされたので、ピストンの降下する力によりそのバケットが引き上げられた。

彼はその後この配置を変更し、凝縮水槽をシリンダが載せられる橋脚へ近づけてその橋脚と機関のレバー壁の間のスペースへ移し、そして空気ポンプを大レバーの屋内側の位置から吊り下げた。その結果、空気ポンプバケットはつり合い重りにより引き上げられることになり、したがって、つり合い重りは若干の増加を必要とした。

(p.326) これは現在一般的になっており、有利な配置である。なぜなら、排気管 g g が短くなって凝縮するために蒸気が移動する距離がより短くなり、したがって、シリンダはより短時間で排気されるからである。また、ピストンがシリンダの最上位に来た時、空気ポンプのバケットは引き上げられており、蒸気がシリンダに入れられる前にコンデンサの中で真空が準備されており、そのため、蒸気はコンデンサの中へ急速に流入し、コンデンサ内に残っている空気と希薄な蒸気に作用して、その一部を空気ポンプの下部の弁を通じて真空の胴の中へ押し入れ、ポンプの次の行程で引き上げられるのを助けることになる。

このようにすれば、ピストンが降下する間にポンプの作業行程を行う場合より、より多くの空気が空気ポンプの中へ入る。なぜなら、この場合は、空気はそれ自身の弾性だけにより下部の弁を通過できるからである。

最初の機関で非常に多くのトラブルを引き起こしたシリンダの欠陥は、主として、シリンダの内面を中ぐりするための新しい機械のお蔭で次第に解消された。その新しい中ぐり機械はジョン・ウィルキンソン (John Wilkinson) 氏により、1775 年頃にチェスター (Chester) 近郊のバーシャム (Bersham) の彼の鑄造工場で導入された。それまでの古い方法では、金属を削る中ぐりバイトはその送りの間にガイドされておらず、そのためにバイトは、鑄造した時にシリンダに与えられた誤った形状に従って送られた (p.291 を参照)。シリンダのすべての部分が円形となることは稀にしか確保されず、シリンダが真直であるという確実性もなかった。この従来の方法は古い機関には十分であると考えられたが、ワット氏の機関はより高い精度を必要とした。

現在一般的な中ぐり機械となっているウィルキンソン氏の機械は、中心となる強力な真直の棒を有しており、それは中ぐり作業の間シリンダの中心軸を占めている。そして、中ぐりバイト (bore) つまり切削工具はこの棒に沿って接触して正確に滑り、完全に真直に作られたその棒は一種の定規の役目を果たし、送られていく中ぐりバイトに直線方向を指示して、シリンダを長手方向に等しく真直で、かつ周方向に真円の形状に製造する。この方法は、可能なあらゆる正確さで中ぐりすることを確実にする。なぜなら、もしシリンダが非常に歪んで鑄造されていても、求められたシリンダを形作るのに十分な金属部材がありさえすれば、その機械が余分の部材を切除することによって、それを真直にかつ真円に中ぐりするであろう。

種々の種類のピストンとパッキンの材料を繰り返し試した後、ワット氏は最終的にパッキンとして麻に決定し、それをそれ以降、普通に採用されている方法でピストンに用いた。

ピストンはその側面底部に突き出たリムがあり、シリンダの中で自由に動けるだけの隙間を残して、そのリムはシリンダにできる限り正確にはめ合わされている。このリムより上のピストン部分はシリンダより小さくなり、シリンダとの間に約 2 インチ幅の円形の溝つまりチャンネルを残している。その溝の中にガスケットと呼ばれる麻または柔らかいロープを押し込んで、パッキンを形成する。そして、パッキンをその位置に保持するために、ピストン頂部の上にはカバーつまり蓋が載せられ、カバー下面についたリムつまり突出部が円形の溝に入ってパッキンを押さえ、そのカバーはねじで下方へ押しつけられている。ピストン周囲の溝の下方部分は、パッキンを押す圧力によりパッキンがシリンダの内面へ押し付けられるように、丸く曲線状に作られている。ピストンには溶けたグリースを供給し続けねばならず、その目的のためにシリンダ頂部の上にロートが付けられ、コックのついた配管でグリースを流下する。

シリンダの頂部のピストンロッドを囲むパッキンボックスにも、類似の方法で麻が詰められ、ロッドを通す穴の開いたカラーつまりグランドがねじで下へ締めつけられ、パッキンをロッドのまわりの位置で閉じ込めている。ピストンとパッキンボックスの両方共、麻が緩くなって漏れるようになると、ネジを下方へ締めて麻を圧縮して接触を密にすることにより、それをタイトに漏れなくすることができる。

(p.327) ワット氏は非常に早い時期に、大多数の種類のグリースはピストンをタイトに保つ目的にかなうが、牛または羊の獣脂が最も適しており、最も分解し難いことを見出していた。シリンダが新しくかつ不完全に中ぐりされている時、グリースはすぐに無くなってピストンは乾いてしまう。そのため彼は、シリンダを潤滑しかつ熱や真空により分解しないある物質をグリースに加えて、濃厚にすることにより乾くのを押しとどめようと努めた。黒鉛の粉末が適当な物質のようであり、特にシリンダまたはピストンのパッキンが新しい時に、そのために使用された。しかし、その後になって、ゆっくりながら黒鉛はシリンダを摩耗することがわかり、また、より完全な技術によりシリンダが正しく作られるようになったため、黒鉛を必要としなくなった。または、少なくとも、最初に動かされる非常に短期間だけ必要とされるようになった。

シリンダが完全に正確で内面が平滑であるときは、ピストンに伴う困難はない。なぜなら、麻のパッキンはピストンのまわりの溝に全く固く詰め込まれるが、数行程を行なった後では、それは自由に動くようになるであろう。実際、パッキンには一切弾性も柔らかさも無いが、それはどう見ても固体のピストンであり、シリンダ自身の中がかたどるでシリンダに完全にフィットする。そして、それが摩耗して緩くなると、ネジで圧縮された麻がシリンダの中で新たにかたどられて、これによりそれ以前と同様にうまくフィットするようになる。古い機関では、パッキンは水により柔らかくスポンジ状に保たれ、シリンダの小さい不規則性に、ある程度合わせる事ができたので、シリンダの完全な形の重要性は、ワット氏の機関より低かった。ワット氏の機関ではパッキンは常に熱く乾いていて、非常に固く押し込まれており、不正確なシリンダでは、パッキンは正常に動作することができない。

ワット氏の改良の経過は、以下の日付から辿ることができるであろう。1767 年および 1770 年に、ワット氏はスコットランドで、モンクランド (Monkland) 運河の計画と、ハミルトンのクライド (Clyde) 川に架ける橋の計画に雇われていた。彼は、彼の 1769 年の新しい発明に基づく蒸気機関をまったく製造せず、彼のすべての関心は他の物に占められていたように見える。しかし、1774 年に彼はパーミンガム近くのソーホーへ移動し、ポールトン氏との協力関係を築き、間もなくそこで最初の機関を製造した。

以下に示すように、水車の戻り機関を新しいシステムに基づいて作り直すという、キャロン社へのポールトン氏の提案の抜粋からわかるように、1776 年には、ポールトンとワットの両氏は、彼らの新しい機関をかなり完全な程度にまで持ってきていた。

「直径 36 インチから 72 インチまでの全てのサイズのワット氏の機関は、等しく安価に水を上げるであろう。その燃料消費は正に蒸気の使用量であり、蒸気の使用量はシリンダの容積に比例するであろう。蒸気の無駄は、大きい機関より非常に小さい機関で確かにより大きくなるが、36 インチのシリンダと 72 インチのものとの間では、損失の比率にほとんど差異が見られない。

私たちのソーホー機関のシリンダは直径わずか 18 インチであり、そのポンプは水を高さ 24 フィートへ上げる。そして、1 cwt のウェンズベリーのくず炭および塊炭で 3000 行程を行い、各行程で 7.8 立方フィートの水を高さ 24 フィートまで上げる。

私たちは、水車を水に戻すための機関の建造を管理するというキャロン社との契約に、異議はない。そして、キャロンで機関用に普通に用いられる石炭 1 cwt で、20 000 立方フィートの水を高さ 24 フィートへ (= 480 000 立方フィートの水を高さ 1 フィート高さへ) 上げることを、私たちは保証する。もし、それ以上のことができれば、私たちの利益として節減量に比例する額を頂くであろう。

直径 50 インチシリンダの機関は直径 52 インチのポンプを動作させ、高さ 24 フィートへ揚水するであろう。私たちはこのような機関を 1 台、スタッフォードシャーのチップトン (Tipton) 近郊に建造し、稼働させる準備ができています。建屋と機関それに関係するすべてのものを加えて、約 2000 ポンドとなるであろう。

私たちは、機関の建設で利益をめざしているのではなく、燃料の節減から利益を取り出そうとしているのである。そのため、何も節減しない場合は何も得られない。私たちの条件は以下のとおりである。私たちは、建屋と機関および付属物に必要なすべての計画、図面、および建造を、特に、鉄の鋳造・鍛造作業および機関に関係するその他の全ての事項を実施する。私たちはあなた方の労働者に必要なすべての指示を与え、彼らは絶対的にそれに従わねばならない。私たちは、弁およびソーホーでの正確な製作を要する他の全ての部品を、明記された価格でソーホーで製作して提供する。すべての部品は組み合わされて、きちんと動作するように設定されるであろう。私たちは1年間保守の仕事を継続し、また、7年の保守に対して、移動距離に伴う不便以外にはいかなる異論もない。そのように建造される機関は、燃焼する石炭 1 cwt あたり、少なくとも 20 000 立方フィートの水を高さ 24 フィートに上げることを保証する。

(p.328) このすべてが完了したとき、その機関と、あなた自身の機関またはスコットランドの他の任意の機関との間で、公平で率直な比較が行われねばならない。その比較から、節減できた燃料の量を見積もり、それを3等分し、これらの部分の一つに対する権利が、特許ライセンス、設計料、等々への返礼として、私たちに与えられるべきである。節減量の私たち自身の取り分は、以下のように見積もられるであろう。ボイラの下で投入されるあなたの石炭の価値に応じた金額で、そして、あなたが稼働し始めた日から25年間、あなたは毎年私たちにその金額を支払わねばならない。ただしその期間は、あなたが機関の使用を続ける場合に限られる。また、あなたが機関を転売するか他の場所へ移動する場合は、あなたは事前に私たちに通知しなければならない。なぜなら私たちは、そのような新しい場所での石炭の価値に応じて、燃料の節減量の3分の1の取り分の権利があるからである。これは必要条件であり、さもなければ、私たちが2000ポンドの出費であなたのために製造した機関は、コーンウォールで10000ポンドで売却されるかもしれない。

このようにソーホーで私たちが製作する機関の部品に対して、私たちは公正な価格で代金の支払いを受けるであろう。私がこれまで行える機会を得たすべての観察をもとにして、私たちの機関は一般の機関より4倍優れていると、私は結論している。非常に高価な品目であるボイラでは、節減は石炭の節減量に比例する。私たちの機関を、同じサイズではなく同じパワーの一般の機関と比較するならば、1台建造する初期費用は、ほとんど同じであることがわかるであろう。

ウィルキンソン氏は、ほとんど誤差のないいくつかのシリンダを、私たちに中ぐりしてくれた。私たちがチップトンに設置した直径50インチのシリンダは、古いシリンダの厚みをどの部分でも切削し損じていないので、あなた方が中ぐりの方法を改良するか、または私たちがあなたたちにシリンダを提供しなければならない。」

1777年に、ワット氏は、ウィルキンソン氏の所有するランカシャーのウィルソン・ハウスの製鉄炉に送風するための、蒸気機関を建造した。機関と炉は、泥炭を燃料として動かされた。それは直径約30インチのシリンダを持ち、大レバーの他端には直径約36インチの送風シリンダつまり空気ポンプを持っていた。この送風シリンダは両端とも閉じられて適当な弁を備え、そのピストンロッドは送風シリンダの頂部つまりカバーの皮革のカラーを貫通し、上昇と下降の両方で空気を送風した。この複動の送風シリンダからの空気は、ほぼ同じサイズのもう一つの調整シリンダに入れられた。その調整シリンダは上端が開放されていて、重りを載せられた遊動ピストンが取り付けられ、いわばシリンダの中の空気に浮かぶように上下した(第4章 p.282を参照)。これは、複動式の空気ポンプまたは炉用送風シリンダの最初の適用例であり、今日ではそれは一般的な実際となっている。

1778年に、ワット氏はシュロップシャーのケトレー(Ketley)製鉄炉で1台の機関を建造した。シリンダは直径58インチであり、直径34インチのポンプ2台を動かし、水車を回すために水を36フィートの高さへ上げ、その水車で炉への送風機械が起動された。

1778年に書かれたプライス(Pryce)の"Mineralogia Cornubiensis (コーンウォール鉱物学)"によると、ポールトンとワットの両氏はその後、スタッフォードシャー、シュロップシャーおよびワーウィックシャーの諸州でいくつかの機関を建造し、そして、ロンドン近郊でも小さい機関を1台建造した。

「コベントリー近郊のホークスベリー(Hawkesbury)炭鉱でワット氏により建造された機関は、イングランドで最も強力な機関であると思われる。そのシリンダは直径58インチであり、ピストンは行程長8フィートで、毎分12行程を行い、ポンプは直径14インチ、揚程65ファゾムである。ポールトンとワットの両氏は現在3台の機関を、コーンウォールのTing Tang、OwanveanおよびTregurtha-downsで建造中である。彼らは、Huel-Bussy鉱山で小型の機関を動かすことが最近決まった。それはシリンダ直径30インチ、行程長8フィートで、毎分14行程を行い、直径6½インチのポンプを2台動かす。それは深さ300フィートの別々の2本の立坑で、それぞれ揚程45ファゾム、合計90ファゾムとなり、ポンプは摩擦の大きい平らなロッドで動かされる。

機関は、所有者の費用で建造される。ポールトンとワットの両氏は、その地の技術者が機械を完成するのに必要

な図面、説明書および付属文書を提供して、そして、すべての利益の代わりに、近隣の同じ大きさの一般の機関と比較して、その機関が1年間に節減した燃料費の $\frac{1}{3}$ を取得する。ワット氏の新しい機関は1 cwtの良質の石炭により、20 000ないし24 000立方フィートの水を高さ24フィートへ(= 480 000 ~ 576 000立方フィートの水を高さ1フィートへ)上げるであろう。」

この期間にポールトンとワットの両氏により作られた機関は、ほとんど、私たちがこれまで述べた案に従ったものであった。ピストンを下へ押すのに、大気圧の空気に代わって、すべての場合で蒸気の弾性力が用いられ、蒸気はシリンダから分離された別の容器内で凝縮された。コンデンサは外部からの冷却により常に冷却され、補助的に冷水噴射を用いて冷却されて、冷却水は後で空気ポンプにより引き出された。ワット氏によるこれら二つの改良は互いに別のものであり、シリンダから蒸気を排出するためにコンデンサと空気ポンプを使用し、シリンダは上部を開放して、ニューコメン機関の普通の方式のように、ピストンの上に大気圧の空気を作用させることもできたであろう。しかしその場合、冷水のシリンダ内へ注入を避けることにより、それまで凝縮により失われていた大部分の蒸気を節減することができたであろう。

(p.329) ワット氏のこのすべての発明のうち、このように分離コンデンサだけを部分的に採用して、ニューコメンの方式による既存の機関に適用するとすると、非常に便利であった。なぜなら、それまでのシリンダとピストンは、その接続棒、大レバーから吊るす鎖などすべてと共に、変更されずに残ったからである。しかし、シリンダに密閉したカバーを取り付けて、蒸気がピストン上面に作用できるようにするには、シリンダとピストンを、そのすべての付属物と共にまったく新しく建造することを必要とした。そして製作の正確さを確保ことが不可欠となったが、それは、その当時は達成が極めて困難であり、特許権者を除いてほぼ不可能くらいであった。その特許権者は、特にその目的のためにソーホーで彼らの新しい作業場を設立していた。そして彼らが、ワット氏の案に従って適切に製作したシリンダやそのカバー、研磨ロッド付きのピストン、およびスピンドル弁等入手した後でさえも、その構造の目新しさと、そのような新しい部品を良好な状態に保つために予想される困難とのために、新しい機関を必要とした人々は強い異論を唱えた。

これらの異論を避けて、なおかつワット氏の発明の一部を利用するために、大気圧機関にコンデンサ使用の許可を与えることが、しばしば特許権者に対して提案された。この問題についてのワット氏の考えは、1778年にそのような許可を申し込んだスミートン氏への手紙の中で、以下のように述べられている。

「私は一般の機関でのコンデンサの使用の適否を何度か考慮してきて、その視点からソーホーの私たちの機関で実験してきた。しかし、他のどこかでそれを試みるよう促すような結果は私は見出せなかった。私たちはコーンウォールのホイール・バージン(Wheal Virgin)機関やその他の機関へのその適用を拒否した。私たちの理由は、彼らの現在の機関を用いて鉱山をより深くすることはできたかも知れないが、それでも、完全な機械と比較して燃料の節減は大きくなかったからである。状態が良くない機関にコンデンサを付加することにより、私たちが最も豊富な鉱山と考えているその地方へ私たちの機関を導入できたであろうが、私たちにとってもまた冒険家(鉱山主)たちにとってもそれは好ましくなく、満足できるような利益は得られないであろう。そして、もしそれらの1台にコンデンサの使用を認めるならば、私たちはすべてにそうしなければならず、それによって私たちの利益を損ない、おそらく評判を傷つけたに違いない。またその上、新しい機関が建造されて職人の技術と材料の点でも同様にうまく行われている所では、古い案に基づいて私たちのものより大幅に安価に同じパワーの機関を作ることにはできない。なぜなら、建屋、レバー、鎖、およびすべてのポンプと立坑仕掛けは同じでも、私たちのボイラとシリンダは非常に小さいからである。

現在私たちは、扱いにくい鑄鉄製の外側シリンダは取りやめて、シリンダとの隙間1インチ半以内、

シリンダ上部のフランジとの隙間 6 インチ以内とし、下部のフランジとの間隔 3 インチ以内の錬鉄板のケースで置き換えている。これは、(それまでの) 外側シリンダと同様に機能するようである。私たちは、全く外側シリンダのない機関を数台製作したが、燃料の消費がかなり大きかったので、経済性の面で称賛する理由はない。

私たちは、同じ種類の石炭を燃やす普通の機関と比較して、私たちの機関で節減される燃料に比例して代金(利益)を請求する。私たちは、これらの節減額の $\frac{1}{3}$ を、毎年または半年ごとに私たちに支払うよう求めている。その支払いは、私たちの雇い主のオプションで 10 年の購入で償還できる。そして、石炭の価格が低い時には、私たちは技術者として若干の料金を課さざるを得ない。これらの比較すべてにおいて私たち自身の利益は、節減の割合をより大きくできる場合を除いて、あなた(スミートン氏)の改良された機関を比較対象から除外させてもらっている。

排気管内に水噴射して蒸気を凝縮するという案は、他の種類のコンデンサと同様に早い時期からあり、私はキネイルで大型機関に試みた。しかし、その機関の他の欠陥により、私は、劣悪な真空は噴射水と共に入った空気のせいであると考えた。そして、私はそのため冷水噴射を取りやめ、大きい機関用の管式コンデンサは大型で高価となるため、便宜的にパワーの一部を犠牲にして、より大きい空気ポンプを採用することに決めた。ペドワースで私たちは下に 2 台と上の中央に 1 台配置して、3 台の空気ポンプを用いた。中央の空気ポンプは他の 2 台により持ち上げられる熱水を受け取り、そして、大気の圧力にさらされる表面を少なくすることになり、水をより容易に引き上げた。レバーはりをねじる可能性の危惧が、私が 3 台のポンプを使用した理由である。私たちは、より小さいの機関では常に 2 台のポンプを用いた。現在、私たちは最大の機関に対してわずか 2 台のポンプを用いているが、その一方のポンプの断面積は他方の 2 倍としている。」

(p.330) 1778 年の同じ返信の中で、ポルトン氏は以下のように言っている。

「私たちは、この夏、コーンウォールで 4 台の機関を稼働させる。そのうち 2 台は、直径 63 インチのシリンダであり、1 平方インチあたり 11 ないし 12 ポンドの荷重で動作することができる。

私たちは、以前にボタン製造工場で行ったように、機関製造のビジネスを体系化しつつある。私たちは労働者を訓練しており、ワット氏の機関の部品を普通の製作方法で作るのに比べて、より正確にかつ安価に他の場所で製作するための工具や機械を作りつつある。私たちの仕事場と装置は、この国にまもなく必要になると思えるすべての機関を製作するために、十分な発展性があるであろう。そして、他のどの技術者も類似のもの設立に出費する価値はなくなるであろう。なぜならば、それは 1 ブッシュェル^{*13}のコーンを挽くために水車を建造するようなものである。

私はあなたに、経験上、ソーホーの私たちの小型機関は石炭 112 ポンドを用いて、水 500 000 立方フィートを高さ 1 フィートへ上げることができると保証することができ、また、それ以上多くを上げることができている。ワット氏の機関は、絶えずより深さを増している鉱山で非常に大きい利点がある。たとえば、ある鉱山は深さ 50 ファゾムであるとし、あなたは鉱山が深さ 100 ファゾムで稼働される時に排水できる機関を持っているとすると、それが 50 ファゾムまたは 100 ファゾムの深さ、または、その中間のどんな深さでもであろうと、常にその機関をその荷重に適応させることができる。そして、鉱山が深さ 100 ファゾムになる時に、その機関が私たちの機関の通常の動作である平方インチあたり 11 ポンドの荷重で動作すると仮定すると、深さがより浅い時の石炭の消費は、より深い時に比べ

*13 (訳注) 1 bushel(英) = 36.4 liter

て、その深さに比例して少なくなるであろう。」

1.4 ニューコメン機関に対するワット氏の機関の利点

ワット氏の機関の利点は、燃料を経済的に使用する点、および機械の有用な性能を向上する点の両面において際立っていて、非常に重要である。

第 1 に、シリンダはボイラからの熱い蒸気で囲まれているので、常に蒸気自体と同じ温度に保たれる。したがって、その中へ入ってくる熱い蒸気のどの部分も凝縮しない。

第 2 に、コンデンサは常に 100 度の温度、または可能ならより低い温度に冷やされているので、蒸気は極めて完全に凝縮されてシリンダから排出される。シリンダ内に残る蒸気の一部はピストンの下降に対抗できず、そのため、ピストンはボイラからの蒸気的全弾性力により押し下げられる。そして、蒸気の弾性は、必要に応じて大気の圧力より大きくすること小さくすることも可能である。

第 3 に、ボイラからの蒸気の弾性が、大気の圧力に代わってピストンを押し下げるのに用いられるために、空気がシリンダに入ってその内面を冷やすことはない。また、機関はそのフルの力で常に動作しなければならないとの制限を受けることはない。なぜなら、もしシリンダに供給する蒸気の弾性を変えれば、その構造をまったく変更することなく、機関のパワーを非常に大幅に変えることができるからである。

ワット氏の原理に基づき機関の大きさを計算する際に、ピストンへの圧力を極めて簡単に調整できるために、技術者が考えるべきことは、ニューコメン機関におけるよりも少なくなる。ワット氏の実際的设计では、適切な荷重としてピストン表面の 1 平方インチあたり 10 ポンドとされていた。機関を動かす際、もしそれが必要になるのであれば、その荷重は 7 ポンドまで減らしたり 11 ポンドまで増やしたりでき、将来の偶発性に対応することができる。

(p.331) ニューコメン機関では、冷たいシリンダに蒸気が流入した時に蒸気の凝縮により失われる蒸気量は、多くの場合、そのパワーを最終的に発生する蒸気量とほぼ同じくらいの量にのぼることが既に示されている*¹⁴。したがって、これらの機関は、完全に無駄を避けた時に必要な量の 2 倍の燃料を消費している。

ワット氏の改良された機関では、蒸気の浪費はシリンダを満たすのに必要な量の $\frac{1}{4}$ を超えることはなく、そのため、シリンダ容積の $1\frac{1}{4}$ 倍の量が、毎行程供給されねばならない。そして、おそらくこの無駄の大部分はピストンでの漏洩から生じており、凝縮によるものは多くないであろう。

それまで無駄になっていた蒸気を節約するというこの長所に加えて、機関のパワーが非常に増大したことにより、ワット氏の機関は、ピストン 1 平方インチあたり 10 ポンドの割合で荷重がかかった時でも、ニューコメン機関がわずか 7 ポンドで動作する時と同程度に良好に動作する。なぜなら、ニューコメン機関が適切に動作するためには、既述 (第 2 章 p.159) のように、ホットウェルは 152 度以下に冷却することができない。そのため、凝縮せずに作業行程の間を通じてシリンダ内に留まる蒸気の弾性は、1 平方インチあたり 4 lb 近くになるにちがいない。しかし、ワット氏の機関では、ホットウェルは常に約 102 度の温度に押さえることができ、そのため、作業行程の間のシリンダ内で凝縮していない蒸気の弾性は、1 平方インチあたり 1 ポンド以下となる。結果として、実際にワット氏の最初の機関は、最良の大気圧機関が消費した燃料の半分以上で同

*¹⁴ スミートン氏の小型機関 (第 2 章 p.168) では、シリンダ容積はわずか 234 立方フィートで、毎行程 876 立方フィートつまり $3\frac{3}{4}$ 倍の蒸気を消費した。また、ロング・ベントンの機関 (第 2 章 p.174) では、シリンダ容積は 133.3 立方フィートであり、消費される蒸気は毎行程 212.5 立方フィートつまり 1.6 倍であった。

これらは、まさに最高のニューコメン機関の例であるが、p.234 (第 3 章) の記述によると一般の機関は更に大きく劣っていて、控えめに言って、浪費される蒸気は作り出される蒸気の $\frac{1}{2}$ であったと言えるであろう。

じ仕事を行なうことがわかった。

ニューコメン機関の建造では、技術者はその機関の動作を正確に予想しなければならず、それに応じて、機関をつり合わせなければならない。彼は、機関がその仕事を完全に実行できるように留意しなければならないが、そのパワーは荷重を大幅に上回ってはならない。なぜならば、その場合には動作が速くなって、建屋や機械類が耐えられないほどの強い力で、大レバーのキャッチピンがスプリングはりを毎行程打ちつけるであろう。ポンプが空気を吸い込んだりポンプロッドが破損すると、それにより蒸気ピストンは全てを押しつける程の大きい力で急速に下降し、機関はしばしば破壊される。鉱山でのほとんどの操作では、鉱山が深くなるにつれて機関の仕事量は増加し、この追加に耐えられるように最初から作られていなければならない。最初の段階では、部分的な負荷で動作しなければならない。しかし、機関のパワーがその負荷より大幅に大きいときには、あらゆる警戒をしながら大気圧機関を管理することは、非常に難しい。力を和らげる普通の方法については、既に述べた(第2章 p.188)。すなわち、噴射水の供給量を制限して空気コックでシリンダへ空気を混入させる。あるいは、カタラクトにより機関をゆっくり動作させる。または、毎日数時間機関を停止して鉱山に十分な水がたまるのを待ち、その後、集まった水が排出されるまで機関を全負荷で動作させる、などである。

ワット氏の機関は、そのパワーが行なうべき作業の負荷に常に正確に適合しているため、これらの不具合のいずれも存在しない。なぜなら、作業行程の間に、ピストンはシリンダに入ってきた蒸気の弾性により押し下げられるので、抵抗に打ち勝って節度ある運動を生じるように、蒸気の弾性を適当な値に調整することが必要となるだけである。機関の大きさは、最初の段階で鉱山の排水に必要なとされるパワーの2倍を出せるものを選べば、その機関は、簡単にその一部の小さいパワーで運転しても、着実に動作できるであろう。

(p.332) これらの方法の一つは、蒸気がシリンダに出入りする流路を狭くすることである。この目的のために、シリンダからコンデンサへ蒸気が逃げる排気弁は、制御ギアで弁が上がる高さを制限することにより、その円錐形開口部から最大高さの一部分だけ持ち上がるように調整することができ、流路をより大きくまたはより少なく任意に開くことができる。このように与えられる排気弁の開度により、シリンダの下部から蒸気が引き出される速さが決定され、その結果、作業行程の間のピストンの運動の速さが変化する。同様に平衡弁はその開度を調整して、蒸気がシリンダの下部に再度流入する速さを制限することにより、戻り行程が安定した運動となるように調整することができる。

機関の過度の激しい動きを抑制するこの方法は、ワット氏により彼の最も初期の機関に採用され、場合に応じて弁を部分的または完全に開くために制御ギアが調整された。しかし、彼はその後、ボイラからシリンダへの蒸気の流れを制限するという、より良い方法で調整するようになった。このために彼は、ボイラからシリンダ周囲の蒸気ケースへ蒸気を運ぶ蒸気配管の途中に、弁つまり円錐プラグを追加した。彼が絞り弁と呼んだこの弁は、水車のシャトルが車輪に降り注ぐ水の流れを制限し、その結果その運動の速さを制限するのと同じ原理を用いて、機関の運動を調整することだけを目的としていた。

絞り弁は、毎行程開閉するように制御ギアに繋がれているのではなく、機関が全負荷でない限り常に部分的に閉じた状態に保持されている。そして、その絞り弁は、ボイラから出て行く蒸気の速度が速くなり過ぎずに、ピストンの降下によりシリンダ内に生じる空間を蒸気が埋めていくように調整される。その結果、シリンダの上部および周囲の蒸気ケースの空間に入る蒸気は、ボイラの中で以前に占めていた体積よりも大きい空間を占めるように膨張しなければならない、より弾性が小さくなってピストンを押す力が減少する。

この方法による調整は、シリンダへの蒸気の供給の速さを制限するだけであり、その間、ボイラの中の蒸気はその最大限の弾性を保持するので、機関の負荷がかなり大幅に増加した場合でも、機関の動きを遅らせるかも知れないが、それを止めることはない。なぜなら、絞り弁により引き起こされる抵抗は運動の速さを減らすだけであり、遅い速度ながら機関が及ぼすことのできる力を減らすのではないからである。その理由は、負荷

が増加して機関がゆっくり動作する時は、ピストンの下降により蒸気のための空間ができるよりも速く、蒸気は絞り弁を通して蒸気ケースとピストンの上の部分へ流れ込み、その結果、蒸気が蓄積してボイラの中と同程度の弾性を、つまりピストンの抵抗に打ち勝つのに十分な圧力を獲得して、ピストンを押し下げるであろう。

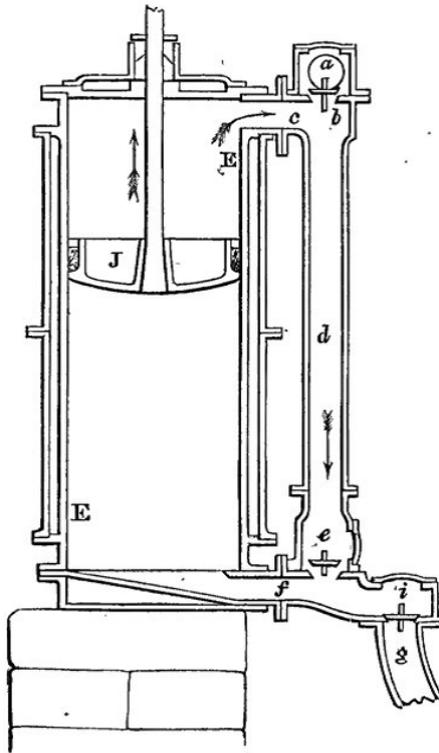


図2 ワット氏の改良型機関 1778

2 ワット氏による機関の改良

2.1 ワット氏の機関の改良型、1778

(p.333) これまで述べてきた機関の形は、鉱山の排水や都市への給水のためにポンプで水を送るために、ワット氏が最初の機関で用いたものであった。彼はかなり多くの大気圧機関をこの案に変えて成功したが、その後、彼は別の部品配置を採用し、シリンダへ供給する蒸気は蒸気ケースを通らずに、蒸気管から弁を通して直接シリンダの上部へ入るように変更した(図2)。蒸気ケースはボイラに繋がっているが、その中へ入る蒸気は、熱を維持してシリンダ内の蒸気が凝縮するのを防ぐ目的のためだけに使われる。このように、蒸気ケースは機関にとって必須のものではなくなり、1778年頃、ボルトンとワットの両氏は、シリンダとの間に約 $1\frac{1}{2}$ の間隔を空けた錬鉄製の板で蒸気ケースを製造し始めた。また、いくつかの場合では彼らは蒸気ケースをすべて取り去ったが、これは経済的に判断ミスであるとなかって、再び元の配置に戻った。

シリンダ E E はピストン J にぴったりはめ合い、その上部はカバーで閉じられる。カバーは、蒸気ケースの一番上のフランジではなく、シリンダ自体の一番上のフランジにネジ止めされる。蒸気はボイラからシリンダまで配管 a で持って来られる。図では、配管 a はその長さ方向に垂直に切断されているので、円形に表示されている。b はその配管の中の制御弁つまり絞り弁であり、c はシリンダの上部への連絡流路であり、その弁のすぐ下にあるので蒸気はこの弁を通じてシリンダの上部へ常に流入し、調整弁 b の一定の開度で定まる強さでピストンの上面を押す。

d はシリンダの底へ下がる蒸気配管であり、ピストンが上昇しようとしている時、シリンダの底へ蒸気を入れるためのものである。そして e は、その連結を自由に開閉する平衡弁である。i は排気弁であり、平衡弁 e が閉じている時に開いて、蒸気を排気管 g を通してコンデンサへ引き出し、コンデンサは既に述べたものと類似の構造である。しかし、コンデンサは噴射弁を備えていて、その中へ冷水の噴射を行って蒸気を冷やし、その中に真空を作り出す。

この機関の動作は以下ようになる。ピストン J がつり合い重りによりシリンダの上部に引き上げられ、排気されている排気管 g およびコンデンサと空気ポンプ以外の、全ての部品は蒸気で満たされているとし、平衡弁 e と排気弁 i は閉じられていると仮定する。ここで、排気弁 i が開かれると、ピストン J の下のシリンダ下部に含まれている蒸気は、それ自身の弾性により弁 i を通って、排気管 g とコンデンサの真空の空間へ急速に流入する。そして、そこで冷水の噴射に出会って蒸気は冷やされて凝縮し、入ってくる蒸気の流入にもかかわらずコンデンサの真空は維持される。結果として蒸気はシリンダから流出し続け、ピストンの下には何も残らないか、または極めて希薄な蒸気だけとなり、ピストンに対して感知できる程の力を及ぼさない。ピストン上面では蒸気が絶えずピストンを下方へ押して、ピストン下面の力は上面の力の対抗力となることはできない。

(p.334) したがって、蒸気がシリンダから排出されるとすぐに、ピストンは動いて作業行程を実行し始める。そして、ピストンは下降し続けて、シリンダの底近くに到達する。そこで、制御ギアにより排気弁 i が閉じられ、平衡弁 e が開かれる。これにより、図の矢印で示すように、蒸気がシリンダの上部から蒸気配管 d により f を通って、シリンダの底の中へ入ることができるようになり、ボイラからの蒸気がピストンの上面を下方へ押すのと同じ弾性で、ピストン J の下面を上方へ押すことになる。なぜなら、シリンダの上部と下部との間には、今や、c、d、e および f を通じて開いたコミュニケーションがあり、そのためにピストンはつり合いの状態に置かれ、結果として、つり合い重りにより引き上げられて、シリンダの最上位置へ到着する。このように、戻りの行程は完了し、平衡弁 e が閉じられて排気弁 i が再度開けられ、前述したのと同じ次の作業行程が実行される。

このスケッチ図 2 は、1779 年にハル (Hull) で建造された機関からとられたものであり、その動作方法に若干のわずかな変更はあるが、これは、揚水用機関の現在の標準的な形である。その変更とは、調整弁 b が毎行程ごとに開閉することと、蒸気がその弁 b に到達する前に蒸気を絞るために、しばしば他の調整弁が蒸気配管内に使用されることである。

2.2 ワット氏の機関の他の形式、1780

すでに記述した機関の二つの形では、作業行程は、ピストンの下方が真空となっている間に、ピストンの上面に作用する蒸気の弾性力により実行される。また、戻り行程を行うために、シリンダの上部と下部の間を導通することにより、ピストンはつり合いの状態に置かれる。そして、平衡弁が開かれて十分な導通が得られるならば、ピストンはニューコメン機関以上に極めてより正確なつり合い状態に置かれる。ニューコメン機関では、変化する蒸気の圧力と大気の圧力が異なると、ピストンの上昇が非常に不確実になる状況が引き起こされる。

ワット氏の機関では、ピストンの上方および下方に同時に真空が形成されたとしても、ピストンはその真空内で上昇することができるような構造になっている。この形の機関が、図 3 に示されている。その図では、前の図と同じ参照記号が用いられている。b は蒸気弁であり、ピストン J を押すために蒸気をシリンダ E の上部へ受け入れ、機関がその戻りの行程を行うとき、この弁は閉じられる。e は平衡弁であり、蒸気配管 d d j g

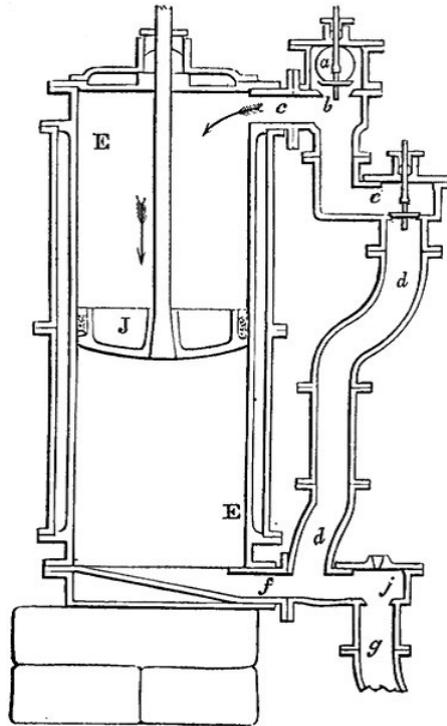


図3 ワット氏の他の形式の機関 1780

の底部に置かれるのではなく、蒸気弁 b のすぐ下に置かれる。その蒸気配管は直接コンデンサへ繋がり、また、枝管 f でシリンダの底にも繋がっている。この通路 f j g により蒸気は常にシリンダの底から引き出され、ピストンの下は常に真空に保たれる。この構造では、平衡弁 e が開けられたとき、シリンダの上部からコンデンサへ蒸気を通過させるので、平衡弁 e は排気弁にもなっている。この機関では、排気管内の j の位置に 1 個の弁が時々置かれたが、それは制御ギアには繋がれておらず、常に部分的に開いた状態で放置され、f と g を通してコンデンサへ蒸気が流れる速さを調整するためだけに用いられた。

(p.335) 平衡弁 e が開かれたとすると、シリンダ上部の蒸気は蒸気配管 c e d g を通してコンデンサへ流出し、ピストンより上のシリンダ上部も真空となる。この場合、ピストンはつり合い重りによりシリンダの上部へ引き上げられ、上端に到達すると、平衡弁 e が閉じられ蒸気弁 b が開かれる。ボイラからの蒸気はここでシリンダの上部へ入り、シリンダカバーとピストンの上部との間に圧力を及ぼし、ピストンを押し下げる。このように作業行程が完了されると、蒸気弁 b が閉じられて、ボイラからの蒸気が更に流入するのを止める。同時に平衡弁 e が開かれて、蒸気がシリンダの上部からコンデンサへ流出し、ピストンの上を真空にする。ピストンの下は既に同じ真空に維持されているので、結果として、ピストンは自由な状態となり、つり合い重りの作用により引き上げられて、頂部まで到達する。そして、平衡弁 e が閉じられ、蒸気弁 b が開かれ、次の下降行程が行われる。

この構造が意図している利点は、ピストンが上昇する全時間が蒸気の凝縮に当てられていることであり、したがって、より良好な真空を作り出せることが期待され、以前の構造のものより行程に要する時間が短くなることが期待される。以前の構造では、シリンダの中の全蒸気の凝縮は、ピストンが行程の最上位に達してから戻り行程が開始されるまでの間で行わなければならない。

しかし実際には、この利点は極めて重要であるというわけではなかった。なぜなら、コンデンサの中での蒸気の凝縮は非常に迅速であったので、シリンダが排気される速さは、蒸気が排気弁と排気管を通過する速さで決まっていた。そのため、作業行程の準備としてシリンダを排気しておくことで達成できたことは、すべて、蒸気がより速くコンデンサへ流れるように、排気弁と排気管を通る流路を大きくすることにより、うまく達成できたからである。

概して、ピストンが真空中を上昇する機関の実際の動作は、他の機関ほど良好ではないことがわかったので、長く使われることはなかった。その一つの理由は、パッキンボックスおよびシリンダカバーの連結部での空気の漏れが大きかったことであった^{*15}。

(p.336) 真空がピストンの下側だけで作り出されると、シリンダ上部の継手は、もしそこが不完全であったとすれば、若干の蒸気が空気中へ逃げる逃げ道となるだけであり、シリンダ下部内へのリークは、下降行程の間に空気が入る可能性だけである。しかし、ピストンが真空中で上昇する場合は、すべての部品のすべての不完全な継手から、絶えず空気が流入する。鉱山の機関では、絶えず修理して最良の状態に維持することは不可能であるため、このことは、戻り行程の間にも凝縮を行う利点をすべて帳消しにするに等しい欠点となる。

機関はまた、真空中でピストンを引き上げるには、蒸気中よりより大きいつり合い重りを必要とすることがわかった。そうしなければ、ピストンはより遅い速度で上昇するであろう。これは、ピストンが上昇する前にシリンダの上の部分に含まれる蒸気は、それが凝縮されてそこに真空ができるためには(または少なくとも、ピストンの下の排気と平衡する状態になるためには)、平衡弁 e と排気管 d g を通過するのに時間を要するためである。そのとき、実際、シリンダからコンデンサまでの弁および配管から蒸気を排気するために、時間または力のロスがいくらであったとしても、それ(その蒸気)は真空中を上昇するピストンにより完全に除去されるのではなく、作業行程から戻り行程へ受け渡されるだけである^{*16}。

ピストンが真空中を上昇するとき、もう一つの状況が機関にとって不利となる。すなわち、シリンダが絶えず排気されているとき、常にその中に残っている希薄な蒸気の温度は 102 度を超えることができず、その弾性は 1 平方インチあたり約 1 ポンドである。シリンダの金属はそれを取り囲む蒸気ケース内の蒸気により 212 度に保たれており、絶えずその希薄な蒸気に熱を伝えるに違いない。これはまったくの無駄であり、さらに、その希薄な蒸気の弾性をより大きくする傾向があり、希薄な蒸気が加熱されなかった場合より、ピストンの運動により大きい抵抗をもたらす。それゆえに、蒸気ケースは無駄の源となるであろうから、このような機関では、シリンダを高温に保たない方がより良好に動作するであろう。

2.3 ワット氏の最初の機関の燃料についての実際の性能

ボルトンとワットの両氏は、最初に彼らの機関を設立したとき、同じ種類の石炭を燃やした一般の機関と比較して彼らの機関が生み出した燃料節減量に比例して彼ら自身の利益を請求した。彼らは特許期間中毎年、彼らへの支払いとしてこれら節減量の $\frac{1}{3}$ を受け取った。ただし、その支払いは 10 年間の支払いで終了とされた。

^{*15} 上のスケッチ図 3 はピムリコ (Pimlico) のチェルシー浄水場で使用されていた機関から、1804 年に著者が取ったものである。それはボルトンとワット両氏により 1782 年頃に建造され、ピストンが真空内で上昇して動作することを意図していた。しかし、その後、機関を以前に記述した方法で動作するようにするために、j の位置に弁を使用して、それを制御ギアに繋いで毎行程開閉するように変更された。この機関の蒸気弁 a もまた、次に説明する膨張行程を行うために制御ギアにより開閉された。

^{*16} (原文) thence in reality, whatever may be the loss of time, or force, to evacuate the steam through the valve and pipe, from the cylinder to the condenser, it is not entirely removed by the piston rising in vacuo, but is only transferred from the working stroke to the returning stroke.

スミートン氏による改良はワット氏による改良と同じ時期に行われ、そのために、スミートン氏の機関との比較は行われず、それ以前の人の機関と行われたということが、念頭におかれなければならない。スミートン氏は、彼以前に行われたいくらかの実験をもとにして、ワット氏の初期のいくらかの機関が同じ仕事を行うとき、その石炭の消費はスミートン氏自身の機関のものの $\frac{1}{2}$ であると推定し、そのことを彼自身の規則、スミートン氏の規則として用いた。これは、大きい機関についてであったが、小型の大気圧（ニューコメン）機関では、蒸気の無駄の比率は大型のものより大きくなる。小さいシリングでの不利があまり影響しないワット氏の機関にとっては、小型機関同士の比較では、より有利となったであろう。スミートン氏は、彼が改良を開始したとき（第 3 章 p.234 を参照）、彼自身の機関を一般の機関の半分だけの燃料を消費すると推測したので、ワット氏の機関の燃料消費は、一般のニューコメン機関のわずか $\frac{1}{4}$ であったにちがいない。

(p.337) 1778 年にワット氏が彼の機関を最初に建造したとき、彼の提案は、ウェンズベリー炭の 1 cwt (= 112 ポンド) の消費により、500 000 立方フィートの水を高さ 1 フィートに上げるができるというものであった。コーンウォールの鉱山のために機関を製造し始めた後、彼はそれらの性能を表すのもう一つ別の用語を採用した。これは、1 ブッシェルの石炭の消費により 1 ミリオンポンドの水を 1 フィートの高さへ上げる性能を単位量として表された。その地区（コーンウォール）では、石炭はサウスウェールズ（South Wales）のスウォンジー（Swansea）から船で持って来られ、ブッシェルの単位で測定される^{*17}。

上記の提案は 1 cwt の石炭により $(500\,000 \times 62.5 =) 31\,250\,000$ ポンドを 1 フィートの高さへ上げることに相当し、1 ブッシェルの石炭は $\frac{3}{4}$ cwt（つまり 84 ポンド）の重さであるとする、1 ブッシェルの石炭の消費により、（その数値の $\frac{3}{4} =$ ） $23\,440\,000$ ポンドを 1 フィートの高さへ上げることに相当する。ワット氏は、当時、以下に説明する彼の膨張方式を採用することにより、極めてより大幅な改良ができることを期待していた。

この提案はスミートン氏に対してなされていて、スミートン氏自身はワット氏の発見を奨励したいと思って

^{*17} 石炭をブッシェルで計量する習慣は、（関税をかけることが可能な）船便で輸送される石炭を除いて、稀にしか実践されない。船便での石炭の大量輸出は、ノーサンバーランド（Northumberland）のニューカースル（Newcastle）、サウスウェールズのスウォンジーおよびカンバーランド（Cumberland）のワーキントン（Workington）から行われる。それらがブッシェルで計量されるとき、石炭はそれらの場所の一つまたは複数の場所から持って来られることが、通常暗黙のうちに了解されている。そして、ニューカースル炭とスウォンジー炭の双方は、ハンドレッドウェイト（cwt = 112 ポンド）およびトン（= 2240 ポンド）で計量されるスタッフォードシャー、ヨークシャーまたはランカシャーの内陸の石炭より、一般に良質である。

ブッシェルで石炭を計量する方法は、山積みの頂上のエッジの上に石炭を円錐形に積み上げるように指定されるが、その堆積物の高さが目で測定されるだけであるので、かなりの不確実性を含む。法律上の石炭ブッシェルの量がいくらであるかを知るには、それは議会のいくつかの制定法を参照しなければならない。

チャールズ II 世の 16 年（1646）および 17 年（1647）の議会の制定法によって、テムズ川に持って来られてチャルドロンで売られるすべての石炭は、36 ブッシェルの割合で積み上げねばならないと制定されている。アン女王の 12 年（1719）の制定法によると、石炭ブッシェル（coal bushel）は、底面が平らな円形で、差し渡し $19\frac{1}{2}$ インチでなければならず、1 ウィンチェスターブッシェルの石炭と 1 クォート（訳注；1 quart = $\frac{1}{4}$ gallon = 2 pints = 1.136 リットル）の水を含まなければならない。現在、ウィリアム III 世の治世 13 年（1713）の制定法により、1 ウィンチェスターブッシェル（またモルト・ブッシェル malt bushel と呼ばれる）は、circular measure で直径 $18\frac{1}{2}$ インチ、深さ 8 インチであり、これは 2150.42 立方インチの体積である。また、1 クォート = 67.2 立方インチであり、従って、石炭ブッシェルの内容量は 2217.62 立方インチとなるべきである。この量を含む cylindrical measure は、直径 18.8 インチ、深さ 8 インチとなるであろう。また、ジョージ III 世の治世 47 年（1807）のもう一つの制定法は、石炭はブッシェルの上に、高さ最低 6 インチで、底部の外径は同じサイズ、つまり直径 $19\frac{1}{2}$ インチの円錐形に積み上げられねばならない、と指示している。この円錐は 597.3 立方インチの体積となる。

したがって、法定の石炭ブッシェルは 2815 立方インチつまり 1.63 立方フィートを含むとすることができるであろう。石炭 3 ブッシェルが袋に入れられ、その 12 袋（= 36 ブッシェル）が 1 チャルドロンとなる。これが、ロンドンで小売りで石炭を勘定する方法である。しかし、卸売業においては、5 チャルドロンを測るとき、 $\frac{1}{20}$ の ingrain または追加手当が与えられ、5 チャルドロンで 189 ブッシェルとされた。それは、プール尺度（pool measure）と呼ばれている。

石炭の重さは種類によりかなり相違するが、チャルドロン（= 36 ブッシェル）は通常、重さ 27 cwt（ $\times 112$ ）= 3024 ポンドと見なされ、それは 1 ブッシェルあたり $\frac{3}{4}$ cwt（つまり 84 ポンド）の割合である。その理由は、劣悪な種類のものでは 1 ブッシェルあたり 78 ないし 80 ポンドを越えないが、最良の品質のニューカースル炭の実際の重さは 84 ポンドであるので、本書の中でもその値が採用されている。

いた。しかし、ワット氏の提案の値は彼の予想を大きく上回ったので、彼はその提案の正確さに対していくらかの疑いを感じた。そのため、バーミンガム運河で建造された機関で、1778年に彼自身の実験を行った。その機関は、その運河の閘門(こうもん)をボートが通過することによる排水を貯水池に上げるために、運河の上に建造されたものであった。

(p.338) そのシリンダは直径 20 インチ、ポンプも直径 20 インチで、27 フィートの高さへ揚水した。ピストンは長さ 5 フィート 9 インチの行程を毎分 11 行程行った。それは、ウェンズベリー炭 65 ポンドで、1 時間動作した。

ピストンの荷重は、高さ 27 フィートの水柱つまり 1 平方インチあたり ($\times 0.434 =$) 11.7 ポンドに等しい。この荷重で、ピストンは毎分 (11×5.75 フィート $=$) 63.25 フィート運動した。

水柱の重さは、高さ 1 フィートあたり ($20 \times 20 = 400$ 、 $\times 0.341 =$) 136.4 ポンド、合計 ($\times 27$ フィート $=$) 3683 ポンドであった。この重さが毎分 63.25 フィート上げられ、つまり、毎分 1 フィート高さへ 232 937 ポンドが上げられ、出力はほぼ $\div 33\ 000 = 7$ 馬力であった。

そして、 $232\ 937$ ポンド $\times 60$ 分 $= 13\ 976\ 220$ ポンドより、65 ポンドの石炭で $13\ 976\ 220$ ポンドを 1 フィート高さへ上げた。これは、ウェンズベリー炭の 1 ブッシェル ($= 84$ ポンド) の消費により、 $18\ 062\ 000$ ポンド、つまり約 18 ミリオンポンドを 1 フィート高さへ上げる値となる。この試験で使われた石炭は小さい塊に砕かれ、ほとんど鶏の卵より大きいものはなく、ナツメグ (nutmeg) より小さくはなかった。

スミートン氏はまた、1779年にハルで、p.333 でスケッチで示した小型機関を試験した。そのシリンダは直径 22 インチで、ピストンは 8 フィート長の行程を毎分 11 行程行ったので、その運動は 毎分 88 フィートであった。ポンプは直径 18 インチで、高さ 34 フィートへ揚水した。この割合で動作する時、石炭の消費は 毎時 90 ポンドであった。

直径 18 インチで高さ 34 フィートの水柱の重さは $= 3756$ ポンドであり、それが直径 22 のピストンに作用して、平方インチあたり 9.88 ポンドの荷重である。毎分 88 フィートを移動する荷重 3756 ポンドは、 $330\ 528$ ポンドを毎分 1 フィート上げるに等しく、つまり、10 馬力に非常に近い。90 ポンドの石炭が 60 分で消費されたので、84 ポンドは 56 分維持できたはずであるから、その間に、機関は 1 ブッシェル (の石炭) により、($330\ 528 \times 56 =$) $18\ 500\ 000$ ポンドを 1 フィート高さへ上げたことになる。

これらの性能は提案よりかなり少ないが、これらは両方とも小型機関であった。より大きい機関であれば、同じ燃料からより大きい効果を作り出すであろうと期待できるかもしれない。その期間で、より大型の機関の性能の正確な何らかの評価は持ち得ていない*18。

1778年に、ボルトンとワットの両氏は、コベントリー近郊のホークスベリー炭坑で一つの機関を設置し

*18 ボルトン氏は 1778 年に、ワット氏の機関での燃料消費を計算するための以下の規則を案出した。

シリンダ内で毎行程ピストンの運動により占められる空間を立方フィートで算出し、ピストンの 1 平方インチあたりの荷重をポンドで表した値を掛け合わせると、その結果は、機関を 1800 行程動作させるのに消費される石炭の重さをポンドで表したものとなる。

例：直径 20 インチ、行程長 $5\frac{3}{4}$ フィートのシリンダは、12.5 立方フィートを占め、 \times 荷重 11.7 ポンド/平方インチ $= 146$ ポンドの石炭で 1800 行程動作する。注意：その機関は実際 660 行程動作するのに 65 ポンドの石炭を消費した。同じ比率で 1800 行程動作すれば、177 ポンドが消費されるであろう。計算による 146 ポンドより少し多い。

この規則は、1 ブッシェルつまり 84 ポンドの石炭で、約 $21\ 750\ 000$ ポンドの水を 1 フィート上げる割合である。なぜなら、面積 1 平方フィートのシリンダと行程長 1 フィートのピストンを考えると、規則によれば、1 ポンドの石炭はその動作を 1800 行程行う。ここで、その効果は、石炭 1 ポンドにより、荷重 144 ポンドで高さ 1800 フィートへ、つまり、 159200 ポンドを高さ 1 フィートへ上げることになる。または、石炭 1 ブッシェルにより、 $\times 84$ ポンド $= 21\ 772\ 800$ ポンドを高さ 1 フィートへ上げることになる。

た。それはシリンダ直径 58 インチ、行程長 8 フィートで、毎分 12 行程、つまり 96 フィートの運動をすることができた。ポンプは直径 14 インチ、揚程 65 ファゾム (= 390 フィート) であった。ピストン荷重は 1 平方インチあたり 9.9 ポンド、水柱の重さは 26 064 ポンドであった。

この機関は、ほぼ 76 馬力であり、それはその当時、イングランドで最も高出力であると考えられた。なぜなら、それは直径 70 インチと 72 インチのシリンダを有し、いくつかの古い大気圧機関の半分以下の燃料消費で、それらより多くの仕事を実行することができた。

(p.339) この機関が試験された当日のいくつかの新聞によると、その機関は 48 時間で 99 711 立方フィートの水を 130 ヤードの深さから上げ、96 cwt の石炭 (つまり毎時 2 cwt) を消費した。そのとき、機関は全速力の約 $\frac{1}{3}$ だけで動作するように、カタラクトで制御されていた。

これは、1 cwt の石炭で 406 000 立方フィートの水を高さ 1 フィートへ上げる割合である。または 1 ブッシェルつまり 84 ポンドの石炭で、約 19 000 000 ポンドを 1 フィートに上げるのに等価である。これは特許権者の標準値よりも低い、大型機関がその速度の一部だけで動作する時不利な条件下であり、そのために、適切な負荷のかかっている小型機関より性能が劣っていたであろう、と考えられなければならない。

3 膨張式蒸気機関

3.1 ワット氏の膨張式蒸気機関、1778

この膨張式機関はもっとも重要な改良であり、ワット氏は 1769 年にその最初のアイデアを持っていたが、1778 年までそれを実行に移さなかった。一般原則は、ワット氏から彼のパーミンガムの友人のスモール (Small) 博士へのグラスゴー 1769 年 5 月の日付の手紙の中で、次のように述べられている

「私は蒸気の効果さをさらに 2 倍にする方法、および、真空へ向かって突入する際の (現在は無駄になっている) 蒸気のパワーを用いてそれをかなり容易に行う方法について、あなたにお話ししました。これはその効果を倍増する以外何もしないでしようが、コンデンサ容器のすべてを利用できるように、容器の機能を拡張するでしょう。それは特に車輪機関 (wheel-engine) に適用可能で、蒸気のみだけが使われているコンデンサの不備を補うかも知れません。なぜなら、一つの蒸気弁を開いて、その弁と次の弁との間の距離の $\frac{1}{4}$ が蒸気で満たされるまで蒸気を流して、そして弁を閉じれば、蒸気は膨張して元のパワーの $\frac{1}{4}$ の弱いパワーで車輪を押して回し続けるでしょう。蒸気のわずかに $\frac{1}{4}$ が使われたにもかかわらず、一連の動作の合計は $\frac{1}{2}$ より大きいことがわかるでしょう。もちろんそのパワーは一定ではありませんが、このことははずみ車かまたは他の何らかの方法により、改善することができます。」

ソーホー製作所の機関が蒸気の膨張原理に基づいて動作するように整備された 1776 年頃まで、ワット氏はこのアイデアを実行しなかった。その原理は、ピストンがシリンダの中で行程長のある一定割合だけ押されて降下した時、それ以降のボイラからの蒸気の流入を締め切り、シリンダに既に入れられている蒸気の膨張する力によって残りの降下を達成するということである。

その行程の終わりでシリンダが蒸気で完全に満たされて、大気の弾性に等しくなっていたならば、コンデンサへの弁が開けられた時、その蒸気は極めて大きい力と速さで真空中へ流出するであろう。この蒸気は、ピストンを押し下げた後でも、まだより多くの力を及ぼすことができるのである。しかし、蒸気が備えているこの余分の力は、それが作用するいくらかの部品が不足しているために、機関にとってはまったくの無駄になっている。このことを考えれば、蒸気の膨張原理を用いた上記の方法の経済性は明白であろう。

シリンダにある量の蒸気が供給された時点で、それ以上の蒸気の供給が締め切られると仮定すると、その後その蒸気が膨張することにより及ぼし続けるすべての力は、そうしなければ真空中への蒸気流出で失われていたはずの力の一部である。そのように膨張する蒸気はその弾性力の一部を失うことが分かるが、ボイラからの蒸気の供給が無くなって以降に膨張している間、蒸気はピストンに十分な圧力を及ぼして運動を持続させるので、それは機関にとって無駄になっているのではない。

この動作方法は、機関に作用する力を調整する手段を与える。なぜなら、制御ギアのプラグはりのピンの位置を変えて、ピストンがそのコースの $\frac{1}{2}$ 、 $\frac{1}{3}$ 等々だけ降下した時に蒸気弁が閉じるように設定することができるからである。そのときその位置まで、シリンダは大気より少し高い弾性のボイラと同じ蒸気で満たされる。しかし、さらにピストンを押し下げるには、そのように入れられた蒸気が膨張しなければならず、その弾性は減少するが、その負荷で行程を完了するには十分となるであろう。機関のパワーはこのように任意に変更することができ、必要とされるパワーの大小に応じてプラグのピンの位置を変えて調整し、ピストンの降下長のうち蒸気はその最大の力でピストンに作用する区間の比率を、大きくしたり小さくしたりすることができる。

(p.340) もし、機関を動作させるこの方法にパワーを調整する以外の利点がないのであれば、それはその目的には絞り弁以上の効果を生み出さないであろう。しかし、膨張原理を適用することにより、蒸気が大幅に節約される。以前 p.179 (第 2 章) で記述したように、ニューコメン機関でピストンが降下する間、その抵抗は一定であり、また、運動部分の慣性抵抗は最初の段階で最大である一方で、ピストンには大気の圧力が常に作用することにより、ピストンの運動は加速される。ワット氏の機関も同じであるが、絞り弁があるので蒸気はピストン位置へある程度制限された速度で到達し、その程度はより小さくなる。絞り弁がない場合またはそれが完全に開かれている場合は、その効果は大気圧の空気がシリンダの上部へ自由に入る場合と同じである。しかし、ピストン降下のある期間以降の蒸気の流入を止めることにより、ピストンはより均一な速度で残りの降下を行うことができる。そしてこのようにして、元の密度の蒸気がピストンを底まで加速しながら押し下げたとすれば、必要となる蒸気量のわずかに一部の蒸気を消費することにより、その行程が実行される。

降下の途中で蒸気が締め切られるとき、それ以降ピストンへ働く圧力は蒸気が希薄になるにつれて減少する。従って、ピストンを押す加速力は減少するので、降下の運動は加速されることはなく、均一な速さに近くなるかまたは遅くなるであろう。なぜなら、その行程の初めではピストンへの圧力は負荷の抵抗をかなり上回るかもしれないが、ピストンが底近くに達するとき圧力は減少して抵抗より小さい値になるであろう。この場合、その運動は可動部分の慣性により続けられるだけである。もしそうしないのであれば、その行程初期のピストンの下降傾向に対抗して、行程を終わらせる傾向を持つ何らかの他の等価な工夫が用いられなければならない。

ピストンへの圧力がどのような規則に従って減少するとしても、大レバー外端の鎖がポンプロッドに常に同じ力を及ぼすように、最も便利な規則に従って倍率を変える機構を作ることができる。

これは、時計のフュージーと同じ原理で行うことができる。フュージーは、その独特な形により、主スプリングの非常に不均一な力の作用を均一な力として歯車仕掛けへ伝える。同様に、ピストンロッドからポンプロッドへの力の伝達において、アーチヘッドを円形でなく適当な螺旋の一部の形に作って鎖を掛けることにより、ピストンがレバーとポンプロッドに及ぼす力を任意に調整して、水を上げる均一な効果を生み出すことができるであろう。

この補償は、蒸気機関の一定の改良と新しい追加の機構についての、1782 年 3 月 12 日付のワット氏の第 3 の特許の主題であった。彼は、p.333 のスケッチ図 2 で示されたプランにほぼ基づいたシリンダの機関を、1778 年にロンドンのシャドウェル (Shadwell) 浄水場で建造した。そこでは、ピストンがその行程の約 $\frac{2}{3}$ 下ったとき上部の蒸気弁 b が閉じるようにプラグのピンが調整され、残りの $\frac{1}{3}$ のピストンの運動は供給された $\frac{2}{3}$ の蒸気の膨張により行われた。この蒸気の緩慢な膨張により減少する力を等しくするための機械仕掛けは必要とされず、その目的のためには大レバー、ピストン、ポンプロッドと他の可動部分の慣性で十分であった。

(p.341) ワット氏の膨張機関の動作についての彼の記述は、下記の表の中に含まれている。表には、ピストンの降下量を 20 のステージに分けて、ピストンへの蒸気の圧力が示されている。ピストンは 8 フィートの行程を行い、ボイラからの蒸気の供給は降下行程の $\frac{1}{4}$ 、つまり頂部から 2 フィート位置で締め切られると仮定されている。ボイラの濃い蒸気^{*19}の圧力は大気の圧力にほぼ等しく、1 平方インチあたり 14 ポンドであり、その運動の抵抗となるポンプの水の荷重は、ピストンの 1 平方インチあたり 10 ポンドに等しいと仮定されている。

したがって、ピストンの降下の際の 20 時点で取られた蒸気のすべての力の合計は、11.57 である。なぜなら、ボイラから入って来た濃い蒸気が直接均一に作用する間は 5 を生じ、蒸気が元の体積の 4 倍に達するま

^{*19} (訳注) 膨張する前の元の蒸気を "dense steam" と呼んでいるので、以下そのまま「濃い蒸気」と表示する。

表1 ワット氏の実験機関の動作

ピストン降下量	蒸気供給	ピストンへの効果		
シリンダ頂部	0.00	ボイラより	1.000	14 lb/in ²
	0.05	そのままの	1.000	14 lb/in ²
	0.10	濃い蒸気を	1.000	14 lb/in ²
	0.15	供給。	1.000	14 lb/in ²
	0.20		1.000	14 lb/in ²
$\frac{1}{4}$	0.25	蒸気供給の 締め切り; その作用は 供給済みの 蒸気の膨張 により生じ る。	0.833	7 lb/in ²
	0.30		0.714	
	0.35		0.625	
	0.40		0.555	
	0.45		0.500	
$\frac{1}{2}$	0.50		0.454	
	0.55		0.417	
	0.60		0.385	
	0.65		0.357	
	0.70		0.333	
$\frac{3}{4}$	0.75	0.312	3 $\frac{2}{3}$ lb/in ²	
	0.80	0.294		
	0.85	0.278		
	0.90	0.263		
	0.95	0.250		
シリンダ底部	1.00	—		
総和			11.570	

で膨張してより大きい空間を占め続ける間の、減少する力の和は残りの 6.57 となるからである。

(p.342) その全行程の間、同じシリンダにボイラからの濃い蒸気が完全に供給されたならば、20 時点を取り出した力の全ての合計は 20 となるであろう。しかしその場合、濃い蒸気の消費は前記の予想値の 4 倍となったであろう。そのため、上記の膨張による方法により、シリンダを満たすのに必要な濃い蒸気の $\frac{1}{4}$ が、 $\frac{57}{100}$ ($= 0.5785$) の性能を発揮する。それは、シリンダ全体を濃い蒸気で満たして得られる仕事の $\frac{1}{2}$ 以上である。そして、この比率より、上記のように体積が 4 倍に膨張する一定量の濃い蒸気が行う力学的パワーは、それが膨張せずに濃い蒸気のまま均一な効果を及ぼすためだけに使われた時のパワーの、 $0.5785 \times 4 = 2.314$ 倍となるであろう。

ロビンソン博士は、ワット氏の膨張機関の作用をより正確に調査した。少し追加して、実務に関わる人にとってより分かりやすくすると、それは以下ようになる。

図 4 で A B C D は蒸気機関シリンダの断面を表すとし、E F はある時刻のそのピストンの表面を表とする。E F が A B に接触している間ボイラから濃い蒸気が自由に入るが、蒸気がピストンを E F の位置まで押し下げるとすぐに蒸気弁が閉じられるとする。それでも、蒸気はそれ自身の弾性と膨張力によりピストン

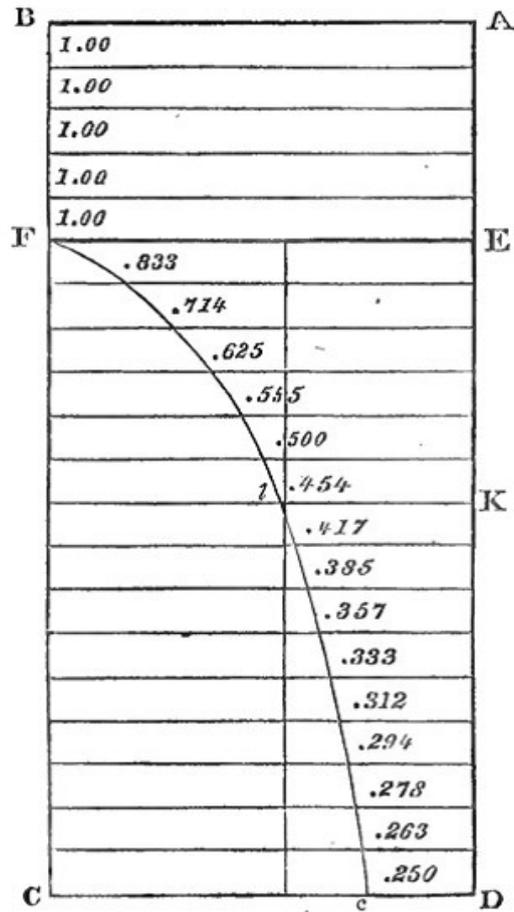


図4 ロビンソン博士による膨張機関の作用の説明

を押し続けるであろう。しかし、蒸気が膨張するにつれてその弾性と圧力は減少しなければならない。

蒸気弁が開いてピストンが AB から EF へ動いている間では、濃い蒸気が及ぼす均一な圧力は線分 EF の長さで表すことができる。その後、空気の場合と同様に、蒸気の弾力がその密度に比例すると仮定するならば、膨張する蒸気が任意の位置にあるピストンに及ぼす圧力の変化は、線分 Kl および Dc の長さで表すことができる。ここで、 Kl 、 Dc は、 A を中心として AD および AB を漸近線とする直角双曲線 Fle の縦座標 (水平長さ) である。

弁が閉じられて以降、つまりピストンが EF から DC まで動く間に、膨張する蒸気により及ぼされる圧力の累積は、面積 $EFleDE$ で表され、全運動の間の累積圧力は面積 $ABFleDA$ で表されるであろう。それゆえに、これらの面積を計算することにより、変化する力のすべての累積によりピストンに加えられる全圧力を見出すことができるであろう。

ここで、膨張を表す面積 $EFleDE$ は、濃い蒸気をフルに供給した四辺形 $ABFE$ の面積に、全区間 AD を蒸気が自由に供給された区間 AE で割った数の双曲線対数 (hyperbolic logarithm) を掛けたものに等し

いことはよく知られている*20。たとえば、 $AD \div AE = 4$ つまり行程の $\frac{1}{4}$ の間蒸気が供給されるのであれば、弁が開かれている間に濃い蒸気によりなされるフルの圧力に 4 の双曲線対数を掛けると、その結果は、膨張している間に蒸気によりなされる累積圧力となるであろう*21。

(p.343) この推論を適用するために、ピストンは直径 24 インチ、= 面積 452.4 平方インチであり、ボイラの濃い蒸気のフルの圧力つまり弾性は 1 平方インチあたり 14 ポンドであると仮定すれば、弁が開いている間、ピストンの上の蒸気の均一な圧力は $(14 \times 452.4 =)$ 6333 ポンドとなるであろう。行程長 AD は 6 フィートであり、濃い蒸気の供給はピストンが EF = 1.5 フィート、つまり行程の $\frac{1}{4}$ まで降下したとき締め切られると仮定する。

ここで、6 フィート \div 1.5 フィート = 4、その双曲線対数は 1.386 であり、そして \times 均一圧力 6333 lb = 8777 ポンドが、膨張の間に変化する圧力の累積である。全行程の間の全累積圧力は、 $(6333 + 8777 =)$ 15110 ポンドとなるであろう。

または、全圧力を意味する面積 ABF1cDA は、 (AD/AE) の双曲線対数に 1 を加え、それに均一な圧力 AB EF をかけることにより直ちに求めることができる。たとえば、 $1 + 1.386 = 2.386$ 、 $\times 6333$ ポンド = 15110 ポンドが、前述のとおり、全行程の間の累積圧力である*22。

機械の計算に多く携わっている全ての者は、常用対数の表を所持している、または所持すべきであるが、ほとんどプロの技術者は双曲線対数の表を持っていないので、以下の方法が実用的となるであろう。

行程 AD の全長を、濃い蒸気が締め切られる前にピストンが降下する距離 AE 割り、得られる商の常用対数を取る。その常用対数に 2.3026 を掛け算すると双曲線対数であり、それに 1 を加え、そして、蒸気が止められる前の濃い蒸気によりピストンに及ぼされる均一な圧力の累積を掛けると、その積は全行程の間の圧力の蓄積となるであろう。

例：行程長 6 フィート \div 1.5 フィート = 4、その常用対数 $0.6020 \times 2.3026 =$ 双曲線対数 1.386。これに 1 を加えて = 2.386。そして $\times 6333$ ポンド = 累積圧力 15110 ポンドとなる。

濃い蒸気が締め切られるまでに、ピストンが AB から EF まで動く間の均一な圧力は、6333 ポンドである。したがって、濃い蒸気のその給気は、全シリンダを満たして最初の体積の 4 倍に膨張する動作の中で、さらに 8777 ポンドの圧力を及ぼし、合わせて 15110 ポンドとなる。

*20 (訳注) 直角双曲線関数 $f(x) = \frac{k}{x}$ の定積分は

$$I = \int_a^b \frac{k}{x} dx = k \ln \frac{b}{a}$$

となる。ただし係数 k は、 $k = \frac{k}{a} a = f(a)a$ より、直角双曲線上の任意点 $(a, f(a))$ と両座標の間で作られる四辺形の面積に一致する。"双曲線対数 (hyperbolic logarithm)" と記されているものは、現代の自然対数である。

*21 4 の双曲線対数は 1.386 であり、したがって、ワット氏が述べた前記の場合では、濃い蒸気により及ぼされる均一な力の累積は 1 で表され、4 倍の空間へ膨張する間に同じ蒸気により及ぼされる減少する力の累積は 1.386 となるので、全ての力の累積は 2.386 となるであろう。ワット氏による計算方法 (p.342) では 2.314 となり、ほとんど同じ値を与える。その差は、膨張の間に減少する蒸気力の計算方法から生じている。

ワット氏の表ではこの力が異なる 15 ステージで与えられていて、その和は 6.57 であり、その減少する力の平均値は $(6.57 \div 15 =)$ 0.438 となる。その力は濃い蒸気が作用する空間の 3 倍の空間で作用するので、濃い蒸気が行う力学的効果の $(0.438 \times 3 =)$ 1.314 倍の効果を生み出す。

ある与えられた数のステージによる計算は、力は徐々に減少するのではなく、各ステージごとに急に変化すると仮定して計算され、したがってステージ数が増えるほど結果が正しくなることは明らかである。減少する力を曲線の縦座標にする他方の方法は、実質的に観測のステージ数を無限大にすることに等しく、対数の助けを借りて、このような曲線の面積を非常に正確に計算することができる。

*22 上記の方法は、ピストンはシリンダの頂部や底部に隙間を残すことなく、その全容積を動いて占めると仮定している。しかし、実際にはそれらの隙間の空間は無視できない大きさである。

表 2 蒸気の膨張作用の効果

蒸気締め切り位置	影響倍数
$\frac{1}{2}$	1.69
$\frac{1}{3}$	2.10
$\frac{1}{4}$	2.39
$\frac{1}{5}$	2.61
$\frac{1}{6}$	2.79
$\frac{1}{7}$	2.95
$\frac{1}{8}$	3.08

(p.344) ピストンが下降している全期間にわたって、濃い蒸気が自由に受け入れられたと仮定すると、累積圧力は 6333×4 、つまり 25332 ポンドとなるであろう。ワット氏が観測したところでは、その場合に消費される濃い蒸気の量は、それが $\frac{1}{4}$ で止められた時の 4 倍の大きさになるが、累積圧力は 2 倍にも満たず、ほぼ $\frac{5}{3}$ 倍であった。したがって、 $\frac{1}{4}$ の蒸気がほぼ $\frac{3}{5}$ の仕事を行う。つまり、運動の $\frac{1}{4}$ の間だけこのように蒸気を受け入れた時は、同じ量の蒸気は 2 倍以上の仕事を行う*²³。

この情報は興味深いものであり、かつ重要である。蒸気機関を操作するこの方法の長所は、蒸気が早く閉じられるほどそれに応じて増加するが、その増加は蒸気が 4 倍程度に希薄になって以降は大きくはない(表 2)。その条件下ではその曲線は漸近線 AD に近く接近してしまっているため、面積の追加量は小さくなる。膨張量をより大きくするためにシリンダを大きくすると、ピストンの摩擦は非常に大きくなり、おそらくその利点を超えるであろう。

(p.345) 次の表(省略)には、この種の計算の実施に要求される範囲の数値の双曲線対数を掲載している。

双曲線対数は、直角双曲線または等辺双曲線、つまり、漸近線が互いに直角になりその共役軸と交軸が互いに等しい双曲線の、漸近スペースの面積を表すので、そのように呼ばれている。漸近スペースとは漸近線と曲線の間に挟まれる面積で、他方の漸近線に平行に等間隔で引かれた線分により区切られる面積であり、この曲線の縦座標の長さは等比数列で減少する。

*²³ 膨張して減少しつつある蒸気の力の合計を計算する上記の方法は、蒸気の弾性はその密度に正確に比例すると仮定している。空気や他の弾性流体を用いた最良の実験は、膨張が進む全期間にわたってその弾性流体の温度が同じ値であり続けるときは、このようになることを示しているようである。しかし、蒸気が膨張する間に追加の熱が蒸気実際に伝えられない限り、それ自体の温度は低下するであろう。そして、その結果膨張している蒸気の弾力は、その密度が減少するよりも速く減少するであろう。

おそらく、ある変化で体積が変わり、そのため蒸気の弾性が変化するとき、異なる温度に対する弾性表で述べられている法則に対応して、(蒸気は)それ自体の性質により新しい弾性に合致する新しい温度となるであろう。たとえば、大気圧の空気と同じ弾性つまり 14.7 lb/in^2 の蒸気は、華氏 212 度の温度である。この蒸気はその弾性が半分、つまり 7.35 lb/in^2 になるまで膨張したとすると、その温度は 178.6 度まで低下するであろう。そして、それがさらに膨張してその弾性が全大気圧の $\frac{1}{4}$ つまり 3.675 in^2 に低下するとき、温度は 149.2 度まで低下するであろう(訳注:蒸気に対するこの推論は、飽和蒸気を仮定している点で誤っている。実際は膨張後は過熱蒸気となるので、正確な蒸気線図(状態式)を用いて、等エントロピー変化などとした計算が必要である。空気等の断熱(等エントロピー)膨張に対して、熱素説を基にラプラス、ポアソン等により盛んに論じられていた時代であり、正確な断熱変化の計算はまだできていなかった。)

ワット氏の機関ではシリンダは蒸気ケースで囲まれて、それにより常に濃い蒸気と同程度に熱く保たれているため、実際は、膨張する蒸気へ熱を伝えてそれを均一な温度に保つ傾向となるであろう。しかし、このような熱の伝達は大きい影響を与える程十分速いわけではなく、上記の計算は膨張する力をかなり過大評価している可能性が高い。なぜなら、実際、曲線 F1c は双曲線ではなく漸近線 AD により速く接近する曲線である。

双曲線対数は、常用対数に 2.30258 を掛けることにより求めることができる。たとえば、4 の常用対数は 0.6026 であり、その双曲線対数は $\times 2.30258 = 1.38629$ となる。

3.2 ホーンブロアー氏の特許、1781

(p.346) ワット氏が既述のようにソーホーとシャドウエルで膨張の方法の試験を行った後、コーンウォール、ペンリン (Penryn) のジョナサン・ホーンブロアー (Jonathan Hornblower) 氏が、「火と蒸気により水または他の液体を上げるための機械または機関」に関する特許 (1781 年 7 月 13 日付) を取得した。

このプロジェクトはワット氏の特許の期間中は有用な結果を生まなかったが、その後価値ある改良に熟成しているため、その最初の起源は注目に値する。ワット氏の特許期間中は、ホーンブロアー氏はすべてワット氏の発明を用いて始めなければならなかったため、彼は特許によって阻まれていた。

ホーンブロアー氏の改良の意図は二連シリンダで蒸気を 2 回以上活用するというものであり、蒸気の膨張原理に基づいて、元の密度でだけ使う単純な方法以上により大きいパワーを得ようというものであった。

ホーンブロアー氏の特許の仕様は、以下のとおりであった。

「第 1 に、他の機関では通常シリンダと呼ばれている蒸気が作用する容器を、2 個使用する。

第 2 に、蒸気が最初の容器内で作用を行った後、他方の容器内で蒸気自身で膨張させることにより、2 度目の作用を行わせる。容器を一緒に繋いで、蒸気が当該容器に適宜入ったり出たりする適当な流路と開口部を形成することにより、それを行う。

第 3 に、金属面の一方側に水を流して、その反対面に蒸気を接触させて通すことにより、蒸気を凝縮する。

第 4 に、蒸気を凝縮するのに用いられた水を機関から排出するために、機関の蒸気容器の下端から水柱で満たされた管または容器を吊り下げ、その下端を別の容器の水中に沈めて、気圧計の原理に基づいて排水する。

第 5 に、凝縮水などと共に蒸気容器に入った空気を排出するために、別の容器にそれを導入し、そこで、蒸気の流入により空気を押し出す。

第 6 に、蒸気が凝縮した水は凝縮容器内に残さず、それに繋がった他の容器に集めて、鉱山の排水として貯水池または川へ流す。

最後に、ピストンに大気が作用するように利用される場合、ピストンの周囲や蒸気容器の側面に蒸気を導入して、それにより、ピストンと蒸気容器側面との間から外部の空気が入るのを防ぐ。」

ホーンブロアー氏はこの特許による機関を、その次の期間まで建造しなかったため、ワット氏の次の発明に進むのが良いであろう。

3.3 ワット氏の 2 番目の特許、1781

この特許の目的は、「蒸気機関または火の機関の振動または往復運動を応用して、軸または中心まわりで継続的な回転または循環運動を生み出し、それにより製粉機または機械の車輪を動かすある新しい方法」(1781 年 10 月 25 日付) となっていた。

この発明は、最後には非常に価値ある応用であることが分かったが、最初の時点では、この特許でも詳述されるように、それは完全なものではなく、蒸気機関の性能にとって、当時までに達成された以上に、より大きい完成度を必要とする応用であった。そのために、それはすぐに実行されなかった。

この特許を取得した時点では、ワット氏は、揚水のための彼の機関の更なる改良とその詳細な構造の完成に手いっぱいであった。しかし、その目的を果たした後、彼は機関のパワーを回転運動の生成に適用することができ、最大の成功をおさめた。したがって、この 2 番目の特許の説明は、それが実用され始めて、機械の発明の歴史の中で最も重要な時代であると示される日まで、延期することにしよう。

3.4 ワット氏の 3 番目の特許、1782

(p.347) この特許の目的は、「揚水および他の機械的目的のための蒸気機関または火の機関のある新しい改良と、同じ目的に使えるある新しいいくつかの機構」(1782 年 3 月 12 日付) となっていた。

その仕様書は膨大で、多くの図面を用いて説明されている。それは、いくつかの異なる改良を含んでおり、以下に示す抜粋と説明がその案を十分に与えるであろう。

「蒸気機関つまり火の機関における私の最初の新しい改良は、ピストンの下降または上昇行程の一部分の期間だけ機関のシリンダ内へ蒸気を受け入れることと、そのピストン行程の残りの期間でその蒸気が膨張してより大きい空間を占めようとする弾性力を用いて、ピストンにパワーを及ぼすこととで構成されている。

また、レバーまたは他の機具の組合せを用いて、蒸気がピストンに作用する不均一なパワーから均一な効果を生じさせて、前記の機関でポンプまたは他の機械を動かすことも含まれている。これらの改善によって、同じ仕事をするのにこれまでは必要とされていた蒸気の、ある大きい部分を節減することができるであろう。

この原理は添付された蒸気シリンダ断面図(図 5) で説明され、そのシリンダは下端は底板で閉じられ、上端はカバーで閉じられている。強固なピストンは上下に容易に滑り、かつ蒸気をまったく通過させないようにシリンダに正確にはめ合わされる。ピストンはシリンダカバーの穴を貫通して滑ることができるロッドで吊るされ、その接合部は、ロッドを囲むボックスにグリスに浸して詰め込まれたオーカムのカラーにより、空気および蒸気に対して気密に作られている。シリンダの上部付近に、適当な弁 a を介してボイラからの蒸気を受け入れる開口部 c がある。

シリンダ全体または可能な限りでその大部分は、蒸気ケースで包まれることにより、ボイラからの蒸気と同じ温度に維持される。

(p.348) すべてのものがこのように設定され、今、ピストンはシリンダ頂部近くにあるとする。シリンダ内のピストンより下の空間は蒸気が排気されて完全に空になっているとし、ピストンより上の空間にはボイラからの蒸気が入るための自由な通路が開いているとする。また、その蒸気は、気圧計の水銀柱を高さ 30 インチに押し上げる大気圧の空気とほとんど同じ圧力つまり弾性力であるとする。

このような場合、ピストンの上部の領域の圧パワーまたは蒸気の弾性パワーは、1 平方インチあたり 14 ポンド(常衡)より大きくなっている。

もし、前記のパワーが、その行程全体を通じてピストンに作用して、ピストンロッドにより直接または、蒸気機関で普通行われているように、大レバーを介してポンプを駆動するならば、機関の全ての可動部分の摩擦と水の慣性パワー(vis inertiae) に打ち勝つ力の他に、このような機関はその行程の全長を通じて、ピストンの 1 平方インチあたり 10 ポンドの重さに等しい水柱を引き上げることができるであろう。

しかし、シリンダの頂部から底までのピストンの全行程つまり運動の長さが 8 フィートであるとし、そして、ピストンが 2 フィートつまり行程長の $\frac{1}{4}$ を降下した時、ボイラから蒸気を受け入れる管路が

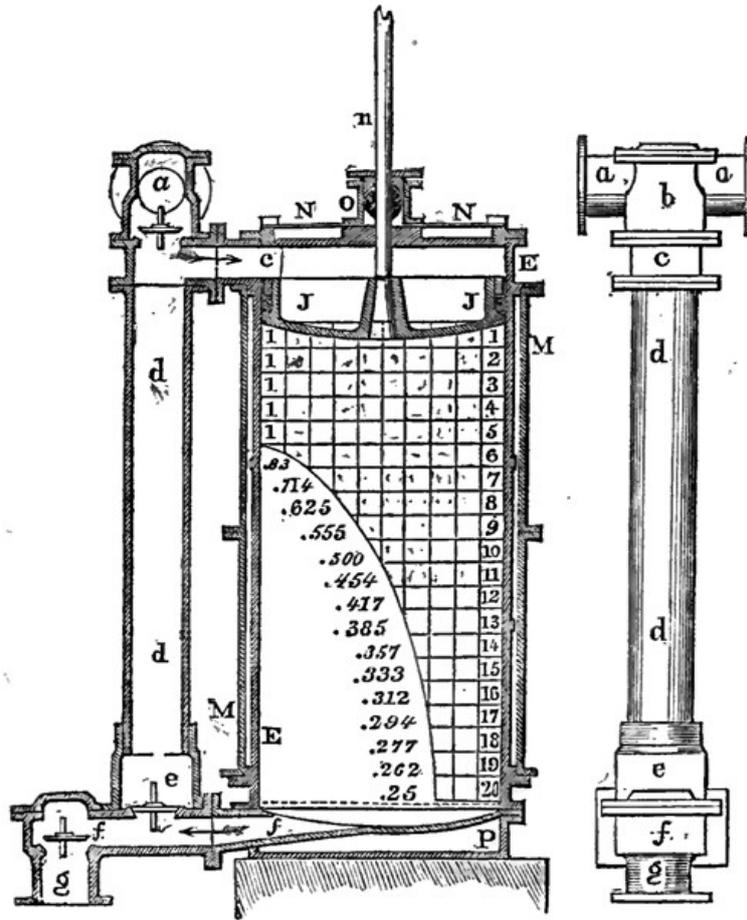


図5 1782年特許仕様書中の蒸気シリンダ

完全に閉め切られると仮定する。この場合、ピストンが4フィートつまり行程長の $\frac{1}{2}$ の距離を下降したとき、蒸気の弾性パワーはピストン面積の1平方インチあたりわずか7ポンド、つまり元のパワーの $\frac{1}{2}$ に等しくなる。また、ピストンが6フィートまたはそのコースの $\frac{3}{4}$ を降下したとき、蒸気のパワーは最初のパワーの $\frac{1}{3}$ つまり1平方インチあたり $4\frac{2}{3}$ ポンドとなる。そしてまた、ピストンが底つまりその8フィート行程の終端に達したとき、蒸気の弾性パワーはその最初のパワーの $\frac{1}{4}$ つまり1平方インチあたり $3\frac{1}{2}$ ポンドとなる。そして、行程長の他のすべての位置における蒸気の弾性パワーは、その図5の水平線の長さ、つまり描かれた曲線の縦座標により表され、さらにその水平線の反対側に書かれた数値により、元の全パワーに対する比率を小数で表している。

これらのパワーすべての合計は最初のパワーの $\frac{57}{100}$ に行程長を掛けたものより大きい。このことより、全シリンダを満たすのに必要な蒸気のわずか $\frac{1}{4}$ が使用されるとき、生み出される効果は、ピストンの全降下行程の間、ピストンの上に蒸気が自由に入るようにして全シリンダを満たして生み出される効果の、 $\frac{1}{2}$ よりも大きいことになる。

従って、上記の新しい膨張式機関は、各行程でシリンダ容積の $\frac{1}{4}$ だけの蒸気の消費により、ピストン面積の1平方インチあたり5ポンドに等しい重さの水柱を容易に上げることができる。

私は最も簡便な例として、シリンダの $\frac{1}{4}$ に蒸気を入れて満たす場合を述べたが、シリンダ容積の他の比率でも同様の効果を生じるであろう。実際の場合では、私はその必要性に応じてこの比率を変えているのである。

ある場合には、ピストンの上方のボイラからの弾性力に対抗して私はピストンの下方に必要とされる量だけの蒸気を受け入れるようにして、外部のあるパワーによりピストンを上方へ引き上げる。そのとき、ボイラからの蒸気はピストンの上方に自由に繋がれて出入りできる。この動作方法は、上で述べたものと同じ効果を生み出す。

(p.349) 蒸気が膨張する間にそれが及ぼすパワーは一定ではないにもかかわらず、上げるべき水の重さまたは機関によりなされるべき仕事は、その全行程長にわたって一定の抵抗値となると考えられるので、何らかの他の手段により作用するパワーを一定にすることが必要である。私はこれを、以下のような種々の方法で行う。

第 1 の方法は、二つの車輪またはセクターを用いるものであり、一方の車輪をポンプロッドに、他方を機関のピストンロッドに繋ぎ、二つの車輪を傾斜したロッドまたは鎖により繋いで、てこ装置として作用する有効長さの比を変えて、ピストンの上昇または下降の間にわたって均一な効果を生み出せるようにするものである。

変化する蒸気のパワーを均一化するための私の第 2 の方法は、鎖を用いるものであり、ピストンが下降するに応じてその鎖は一方の螺旋に巻き上げられ、他方の螺旋から繰り出される。これらのそれぞれの螺旋は二つの車輪またはセクターに固定され、それぞれにピストンおよびポンプロッドの鎖が取り付けられる。

私の第 3 の方法は、摩擦車輪を用いるものであり、それを一方のセクターまたは車輪に取り付けるかまたは吊るして、他方のセクター、車輪または作業レバーの曲線または直線部分に作用させて、運動中心からのその距離を連続的に変えて動作させる。

私の第 4 の方法は、作業はりつまり大レバーの吊り下げる中心位置を、行程の動作時間内で変える方法によるものであり、それにより、ピストンがシリンダ内を下降するにつれて、ピストンを吊るしたレバーの端はより長くなり、ポンプロッドを吊るした他端はより短くなる。

私の第 5 の方法は、蒸気機関の作業レバー（または、それに繋がれた何らかの他の車輪またはレバー）に、大きい重りを取り付けることによるものであり、ピストン降下の開始時にはその重りがピストンのパワーに対抗する方向に作用するが、ピストンが降下するにつれてその重りはピストンが吊るされたレバー端側へ徐々に移動し、その行程の後半ではピストンの動きを助ける方向に作用するようにする。」

これは、作業レバーの上部を曲線状に作り、重いローラーまたは重りを載せてその曲線に沿って転がし、その行程の間でレバー上の重りの位置を変えることにより実現することができる。

または、作業レバーにその運動の中心よりかなり上の高さの位置に大きい重りをつけることによって、同じ効果をもたらすことができる。ピストンが降下を開始するとき、レバーが動いて重りの重心がレバーの運動中心の鉛直上方を越えるまでは、この重りはピストンの運動を妨げる。重りがその鉛直上方へ来た時には、機関に何も影響を及ぼさないが、この位置を越えた後は、重りはポンプのピストンが水の荷重を引き上げるのを助けるように作用する。その位置の重りの大きさと運動中心からの高さとを調節することにより、減少していくピストンの力をほぼ均等にすることができる。

頂部と底部が開いた二つの大きいシリンダと、それにはまり合う弁の無いピストンとを用いて、多量の水の重量を同じ目的のために非常に便利に用いることができるかもしれない。この二つのシリンダのピストンは大レバーの反対側の端に吊るし、一方が下降したとき他方が上昇するようにする。両シリンダは水で満たして一方のシリンダ頂部と他方の頂部とを大きい樋で繋ぎ、それを通じて水の重さが一方のピストンから他方へ交互に移動するように

する。機関がその行程の中ほどに来て、それぞれのピストンが各シリンダの中央に位置するときは、水はそれらの間で均等に分けられて、それらのピストンはレバーの上でつり合って吊るされているであろう。しかし、一方のレバー端が下降するとき、反対側の端に吊るされたピストンは上昇して、その上に載っていた水の一部を樋の中へ汲み上げて反対側のシリンダへ流し込むであろう。そのピストンは下降しているため、水が入るスペースは既にできているので、その結果水は不均等に分配されるであろう。一方のピストンがそのシリンダの頂部に来て他方が底部に来ると、後者のピストンの上にはすべての水が載っていることになる。

蒸気ピストンがそのシリンダの頂部にあるときを考えると、レバーの反対端にある水シリンダにすべての水が入っていて、他方のシリンダには水はまったく入っていないであろう。蒸気が蒸気ピストンを押し下げることによって、それはレバーの外端のシリンダ内の水を上げなければならない。水シリンダ内のすべての水が持ち上げられなければならないので、この水の重量はピストンの運動を妨げるであろう。しかし、蒸気ピストンが $\frac{1}{4}$ または $\frac{1}{3}$ 高さまで降下して、蒸気が締め切られる頃には、蒸気ピストンにかかる圧力は減少し始める。そして同時に、水の一部は樋を通じて流れて反対側のシリンダへ入り始めるので、水ピストンの水の重量は減少し始める。反対側のシリンダへ入った水はそのピストンにかかる重量で蒸気ピストンの降下を助けることになる。上昇するピストンから降下するピストンへ水が規則的に移されるので、ピストンが更に降下することによってこの（水の重量による）助力は増加し続ける。これは、行程の底へ達したピストンの上へすべての水が移るまで続く。

(p.350) 「変化する蒸気のパワーを均一化するための私の第 6 の方法は、ピストンの下降運動の初期部分で蒸気が及ぼす余剰パワーを用いて、ある質量の物体に適当な回転または振動の速度を与えるというものである。その物体はその速度を保持して、下降運動の後半で蒸気のパワーが不足する間に、そのエネルギーつまり勢いをピストンに加えて作用させ、水柱を引き上げるのを補助する。」

これは、ピストンロッドの上に歯形ラックを用いて、はずみ車軸の小さいピニオンの歯にかみ合わせ、ピストンが降下する時にははずみ車をその方向へ回転させ、またピストンが戻る時に他方へ回転させることにより実用化できるであろう。このはずみ車はピストンが動き始める時には静止しているため、その慣性により運動を妨げるであろう。しかし、その慣性が克服されて弾み車が動き始めると、それはエネルギーつまり運動を続けようとする傾向によりピストンの運動を助けるであろう。

更に良い方法は、旋盤または紡ぎ車の足踏み車が作業者の脚で繰り返し踏まれることにより規則的に回されるのと同様に、大レバーを接続棒ではずみ車の軸のクランクに繋いで、はずみ車に連続的な回転運動を与えることである。ワット氏はまた、この目的のために二つの同じ歯車を組み合わせ、地球が太陽の回りを公転するように一方の歯車が他方のまわりを回るようにした。このためにそれらは太陽遊星歯車と呼ばれている。この配置は機関の各往復行程に対して、はずみ車を完全に 2 回転させ、その後、工場の機械類を回転させるのに一般的に使用されるようになった。しかし、この特許の仕様書の中では、膨張の方法で水を上げる機関に対して、変化する蒸気のパワーを均等化する方法の一つとして提案されている。

このように、ワット氏は、膨張する蒸気の変化するパワーを、様々な異なる方法で均等化することを提案したことがわかる。互いにその有効長さを変化させるレバーの組合せによる方法。重りの配置を変えて、最初はピストンに対抗し、その後ピストンを助けるようにする方法。および、速く移動する重りの慣性を用いて、ピストンの動きを交互に遅らせたり助けたりする方法。等である。

「蒸気機関の私の第 2 の改良は、ピストンの上または下に真空を作り出して、同時にピストンの他の側つまり排気していないシリンダ部分に蒸気を作用させることにより、ピストンを交互に押し上げたり押し下げたりして、蒸気の弾性パワーを双方向の動作のために適用することで構成されている。この方法で作られた機関は、蒸気的作用による力がピストンの上側または下側の一方側にだけ及ぼされてきた

これまでの (同じシリンダサイズの) 蒸気機関の、2 倍の仕事つまり 2 倍のパワーを同じ時間内で取り出すことができる。

蒸気機関の私の第 3 の改良は、2 台以上の異なる蒸気機関の蒸気容器つまりコンデンサを、配管またはコミュニケーションのための他の適当な流路で一緒に繋ぐことにある。それらの蒸気機関のいずれも別々の作業レバーまたは他の構成部品を持っていても良く、または、さもなければ、ポンプを動かすか、他の機械を動かすように建造されていても良く、機械類は互いに繋がれていても、または独立であっても、他の機関で動かされていても良く、要求に応じてふたつの機関は行程を交互に行っても、または同時に行っても良い。

蒸気機関の私の第 4 の改良は、ポンプロッドまたはピストンロッドを作業レバーまたはその場で使われる他の機械に吊るして繋ぐために、これまでこのために用いられていた鎖の代わりに、歯形ラックとセクター歯車を用いることにある。

(p.351) 蒸気機関の私の第 5 の改良は、蒸気シリンダを、円筒形の容器のより大きいまたはより小さい、セグメントまたはセクターの形に製作することである。そして、そのような蒸気容器の曲面の曲率中心つまり中心上に、容器の一端または両端を貫通して突き出た回転軸を配置する。蒸気容器の端面は、その中心軸が貫通する適当な穴の開いた平板であり、容器の内部のその中心軸には、軸から容器の円周に達してかつ容器の一端からその他端に及び、一枚の板をピストンとして取り付ける。このようなピストン板が蒸気容器に接する部分にグリースまたは油に浸した麻または他の柔らかい物質で包むか、または鋼または他の弾性固体または柔軟な材料によりつくられたばねを用いるかして、そのピストン板を蒸気に対して気密に保つ。蒸気容器内では中心軸近くから周囲へ広がる 1 枚以上の仕切り板を取り付け、これら仕切り板が中心軸に近接する個所、および前述の軸が容器の端板を貫通する個所は、同様の方法で蒸気と空気に対して気密を保った継手とする。

蒸気容器の中で前記のピストンの各側には、蒸気を流入させたり排出したりする流路つまり開口部を設け、その流路にそのための適当な弁を取り付ける。また、その機関に適当なコンデンサおよび空気ポンプを取り付ける。そして、揚水ポンプ、またはその機関で動かされるよう求められている他の同様の機械は、前記の中心軸の外側の部分に固定した車輪、または他の適当な機構により駆動する。

そのように建造された機関は、固定した仕切りと可動ピストン板の間に蒸気を受け入れて、ピストンの反対側を排気または真空にすることにより、そのピストンが蒸気の力によりその真空の側へ動かされ、機械の構造に応じて中心軸を大なり小なり円の一部だけ回転させる。ピストンは、前記のピストンの他方の側に蒸気を入れて、何らかの外部のパワーにより戻されるか、または、最初蒸気で満たした蒸気容器の部分を排気することにより、元の位置へ戻される^{*24}。」

この特許で記述されたさまざまな発明は極めて創意工夫に富み、ワット氏の称賛に値する事柄となっており、彼が目的にかなうあらゆる方法を詳細に熟考したことを示している。蒸気の膨張を利用する方法は、鉱山の機関に極めて一般的に採用されるようになり、特に最新の機関では大きい利点をもたらした。しかし、その変化する力を均一化するための工夫は実用化されることはなかったし、また実際に必要であるともみなされなかった。それは、以下のような理由による。

揚水に用いられる大きい機関に何らかの螺旋 (第 2 の方法) または傾斜レバー (第 5 の方法) を用いる方法は、大変な困難を伴うであろうし、また、蒸気の膨張を最大限に適用する時、つまり、ピストン降下の極初期

^{*24} この仕様書に付け加えられたすべての図面が銅版画化され、ホール (Hall) 氏の "Encyclopaedia", 二つ折り版 の "Article Steam-Engine", Vol. II として出版された。その仕様書は、後年ワット氏により同じ銅版画を載せて印刷された。

で蒸気供給を停止する時には、膨張原理の作用を均一化するには不十分となったであろう。なぜなら、その作用を均一化するために螺旋が大きく曲がったり、またはレバーが大きく傾斜していれば、螺旋またはレバーの中心に過度の荷重が加わったであろうからである。その後、ワット氏の傾斜レバーの原理をスタンホープ卿 (Lord Stanhope) が非常に賢明な方法で印刷プレスに適用した。しかし、その機械は 1 人の人間の力だけで動かされる程度に小さかったにもかかわらず、プレスの強力な鋳鉄のフレームはしばしば破損した。

(p.352) 重りを持ち上げるその他の原理は大型のスケールでは危険であり、また管理不能であろう。

上記のすべての方法に共通の一つの難点がある。すなわち、それらの方法は、行程の常と同じ個所で蒸気が締め切られることを必要とする。なぜなら、もしこれらの方法のいずれかにより変化する蒸気の力を均一化するように機関を改造するとすると、膨張により引き起こされる変化が同じであり続ける場合に限り、可能となるからである。また、均一化装置の作用は作業行程と同様に戻り行程でも同じになるに違いないので、このため、これらの装置は複動機関に適応できるだけであり、揚水の用途に一般的に用いることはできない。

これより、これら全ては試行的なアイデアであり、実行に移すことのできない計画であると考えてよいかも知れない。そのいくつかは、実用のための提案としてより、むしろ特許の海賊的な抜け道を防ぐ目的で仕様書に記載されたのは疑いない。

動いている質量の慣性による調整法 (第 5 の方法) は、他の方法に比べてより実用可能である。連続的に回転するはずみ車を用いることは、膨張式機関への非常に有益な追加であるが、この特許の中でワット氏が述べた目的のためには、ほとんど使われることはなかった^{*25}。

要するに、力を均一化する何らかの装置が必要となる程に膨張の作用が大きくなる条件で、ワット氏の機関を動かすことは、望ましくないことがわかった。なぜなら、少量の蒸気だけを供給することにより燃料消費が改善されると同時に、所定のサイズの機関によりなされるパワーは徐々に減少するからである。この事情は、膨張の方法の使用を狭い範囲に制限している。

蒸気が大気圧よりかなり大きい弾性を持つ場合、膨張原理を用いて蒸気機関を動かす利点はより十分に発揮される。これは現代のウルフ氏による改良そのものであり、ウルフ機関では、行程の非常に短い部分で蒸気の供給停止を行い、なおかつ、それ程大きくない機関から大きい力を取り出している。

ボルトンとワットの両氏が行ったことは、常に大気圧より少しだけ弾性の大きい蒸気を使用し、機関が動作する環境に応じて、行程の $\frac{1}{2}$ または $\frac{2}{3}$ で蒸気の供給を締め切ることであった。この場合には、大きい機関での圧力の減少は加速を打ち消すほどには大きくはなく、重い作業レバー、ポンプロッドおよび揚水される水柱のエネルギーにより均一に近い運動を生み出す。

1785 年頃にワット氏はこの種の機関を大幅に完成し、構造の形とそのすべての部品の比率の尺度を確立した。それは、現代まで実質的な変更をされなかった。

^{*25} ワット氏が 1782 年頃にロンドンで設置した初期の機関のひとつは、膨張の作用を調整する目的でクランクとはずみ車を用いて作られた。これはチェルシー給水設備のためにピムリコ埠頭 (Pimlico Wharf) に置かれた。著者は 1803 年と 1804 年にこの機関をしばしば訪問して、その部品をスケッチした。当時それは継続的に動作していたが、クランクの接続棒が大レバーから外されていて、長年使われなかったように見えた。p.335 で記述したように、この機関は、最初は真空中で上昇するピストンで動作するように意図されていたが、そこで述べたとおり、それはその後変更された。

4 ワット氏の単動機関の詳細

4.1 ワット氏の鉱山排水ポンプ用単動機関の描写、1788

(p.353) Plate X (図 6) は機関全体の断面図であり、できる限りそのすべての部品、内装、外装を一画面で示したものである。ボイラは機関室の端壁に重ねて建設された外建屋に置かれ、それ自身の別の屋根で覆われた。機関室自体は、p.139 (第 2 章) で前述した大気圧機関のものとはほぼ同じである。

A は火床であり、正面に燃料を投入する扉がある。

B は火格子であり、その上で火を燃やす平行な鉄の棒で形成される。

C C はボイラであり、その横断面図で示されている。それは細長く作られ、上部は軸が水平の半円筒形であり、この上部には蒸気が溜められる。その下部は水を含み、側面が鉛直であり、底部は火の作用を受けるために凹面になっている。ボイラのこの形は、傾斜屋根またはカバーのあるワゴン (荷馬車) との類似性から、ワゴン・ボイラと呼ばれる。火格子 B は長いボイラ的一端の下に位置し、それからの火炎は、ボイラの凹面の底の下をその遠方端まで進み、そこで立ち上がって流路つまり煙道 9 へ入る。煙道は、水が含まれたボイラ下部の外側の全周を囲むように作られている。このように火炎はボイラとその内部の水へ熱を伝え、ボイラのまわりを完全に一巡した後、煙は鉛直の煙突 D D へ逃げる。煙道 9 から煙突への開口部は、通路を開閉するために、水門またはサッシ窓のように上下に移動する鉄のダンパーつまりスライダ w により調整される。このスライド・ダンパー w はプリーに通した鎖に吊るされ、ダンパーがどの位置でも留まれるように、鎖の他端に十分なつり合い重りが付けられる。このダンパーを上下させることにより、機関が必要とする蒸気の供給量に応じて、煙突への空気ドラフトの速さと、従って火格子上の燃料の燃焼の速さとを、任意に調整することができる。

y は、ボイラの水位が適当な高さに達したときを示すための、2 本のゲージ管とコックである。そして T は鉛直の給水管であり、ボイラへ水を供給する。

a は蒸気管であり、ボイラの頂部から始まり、壁を通過して機関室の中へ繋がる。それは蒸気を上部ノーゼル (nossel) つまり蒸気ボックス b へ運び、そこには作業行程を行なうためにシリンダ内へ蒸気を入れる弁が入れられている。

E はシリンダであり、極めて正確に中ぐりされ、可動のピストン J にはめ合わされる。シリンダの上部はカバーで閉じられ、カバーの中央にはピストンのロッドが通過するための開口部があり、その開口部にはロッドの回りに麻がきつく詰められて気密が保たれる。シリンダはその外周全体に隙間を残して円筒形ケース内に収められ、その隙間スペースはシリンダを熱く保つために蒸気で満たされる。この蒸気は大きい蒸気管 a から分岐した小さい銅管により、時折それを締め切るためのコックを介して供給される。蒸気ケースの下部にはドレンコックもあり、蒸気の凝縮により蒸気ケース内に溜まる水をこれで排出する。

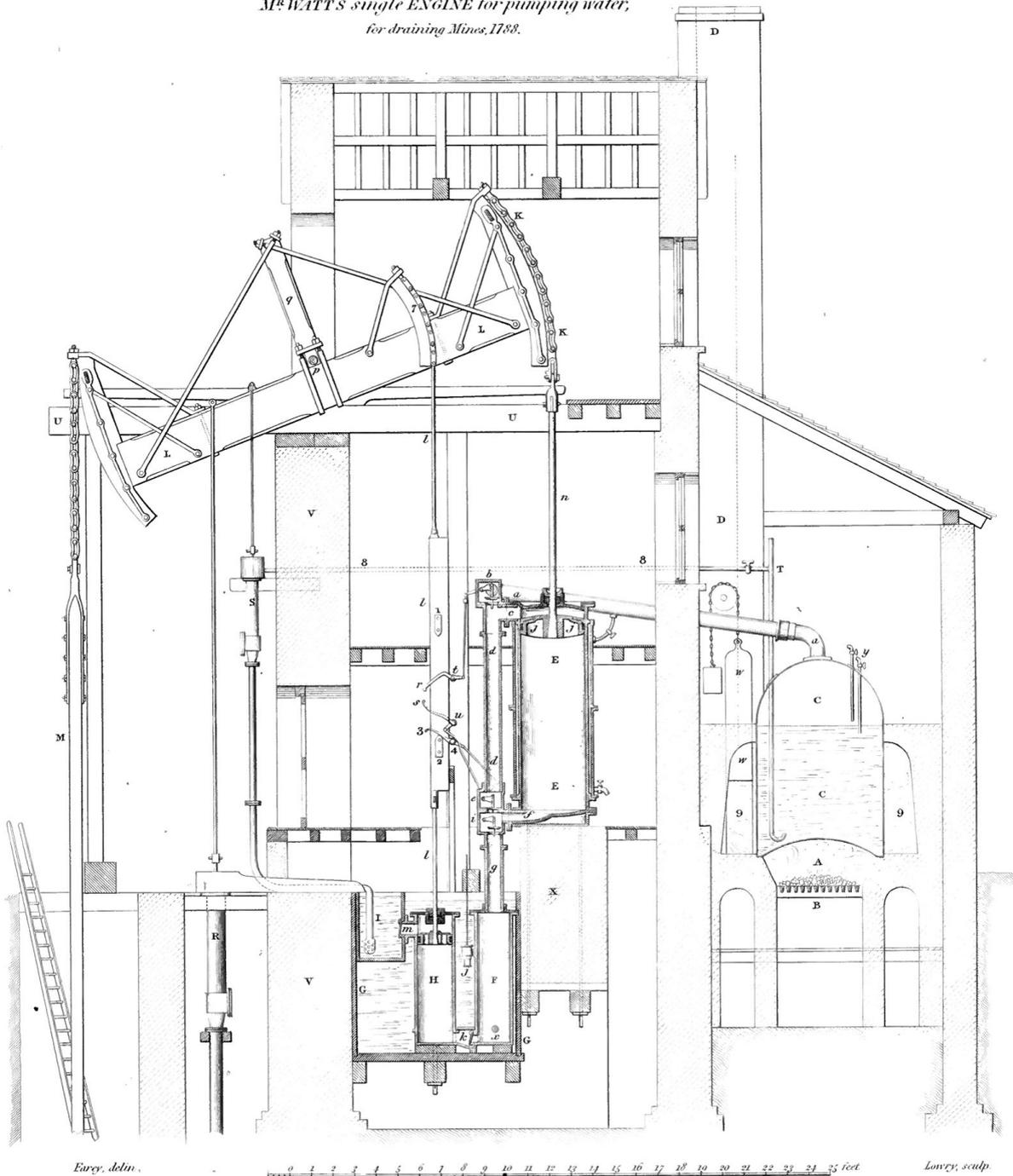
b は蒸気弁を含んだ上部蒸気ボックスであり、蒸気弁が開いたとき、枝管つまり横方向の流路 c を通じてシリンダの上部へ蒸気が入る。機関が下降行程を行うとき、この弁が開かれる。

(p.354) d は鉛直の蒸気管であり、機関が戻り行程を行う時にシリンダの頂部から底部へ蒸気を運ぶ。

e は下部蒸気弁つまり平衡弁を入れているボックスであり、弁が開いているとき、枝管つまり横方向流路 f を通じて蒸気をシリンダ下部へ入れる。この弁は、シリンダの頂部と底部を自由につなぐことによりピストンをつり合い状態にし、つり合い重りによりピストンを上昇させる。

g は排気管であり、蒸気をシリンダからコンデンサへ運んでシリンダを排気し、作業行程の前にピストンの

M^r WATT'S single ENGINE for pumping water,
for draining Mines, 1788.



Published as the Act directs, 1826, by Longman, Rees, Orme, Brown & Green, Paternoster Row.

図6 ワット氏の鉱山排水ポンプ用単動機関 (Plate X)

下に真空を形成する。

i は排気弁を入れたボックスであり、シリンダの底の枝管 f と排気管 g の連絡を開く。

F はレシーバつまりコンデンサであり、冷却するために冷水の中に沈められた円筒形容器で、排気管 g がその頂部に繋がっている。x の位置で、小さい銅管がコンデンサに連結され、その銅管は水槽の外側に延びている。開口部は外側へ開いた小さい弁で蓋をされ、小さい水の容器内へ沈められている。これは、漏らし弁またはブロー弁と呼ばれていて、機関を始動して容器から最初に空気を排出するのに用いられる。

G G は凝縮用水槽であり、空気ポンプとコンデンサを取り囲む冷水を入れている。その水槽にはポンプ R により冷水が供給され続け、常に余剰水またはオーバーフローがあり、排水管で流出される。

j は噴射弁とコックであり、水槽 G からの冷水の噴射をコンデンサ内へ注入して、その蒸気を冷却する。その弁が閉じられると、噴射水の通路を止めて、戻り行程の間の水の流入を防止するが、下降行程では開かれる。そのコックは短い管の途中に置かれ、水がその弁を通過した後の水の流れを調整する。

k は横方向の流路に含まれるフット弁であり、コンデンサ F から水と空気を抽出するために、その下の部分から空気ポンプ H へと繋がる。弁 k は、水と空気がコンデンサから出るときに開くが、戻るときには閉じて防ぐ。

H は空気ポンプまたは排出ポンプであり、その内部は正確に中くりされ、シリンダのように可動ピストンまたはバケットにぴったりと合うが、このバケットには、空気と水を上へ通過させるために穴が開いており、上方へ開く弁が付けられている。その弁により、空気と水が下方へ戻るのを防ぐ。空気ポンプの上部は、シリンダのようにカバーで閉じられ、その中央部を、空気ポンプロッド l が気密なパッキンボックスを通して貫通している。空気ポンプの上部に吐出し口 m があり、熱水と空気をホットウェルの中へ運ぶ。この吐出し口の開口部はフラップ弁 m で閉じられ、その弁は、水と空気を排出して戻りを防ぐように、外側へ開く。

I はホットウェルであり、凝縮用水槽 G の一部となっている。凝縮用水槽は、空気ポンプで排出される熱水を受けとるために、仕切られて小さい水槽を形成しており、凝縮用水槽の冷水と混ざるのを防いでいる。

J J はシリンダのピストンであり、シリンダにぴったり合っている。ピストンは、麻のパッキンで囲まれている。パッキンはピストンの端の一巡する溝の中に固く詰め込まれ、溝にピッタリと合うリングまたはカバーを麻の上から当ててネジで強く押さえて、その場所へ保持される。

(p.355) n はピストンロッドであり、鉄できわめて真直に正確に作られてよく研磨されていて、シリンダカバー中央のパッキンボックスを通過して上下に自由に滑ることができる。ピストンロッドの下端はピストン J の中心に強固に固定され、上端は大レバーの端のアーチヘッドに取り付けられた主鎖 K に繋がれる。

L L は大レバーである。それはオーク材の単一のはりであり、その軸つまり運動中心のまわりに動くことができる。この軸は、はりの上面に鉄の帯で固定される。レバー両端のアーチヘッドは強固に固定され、図に示すように鉄の筋交いで支えられている。はりを強化するために、軸 p の上に垂直な真束 (しんづか; king post) q が立てられ、この真束の頂部から鉄の筋交いが斜めにはりの各先端へ渡され、屋根のそれと類似のトラスを形成している。大レバー L の両端のアーチヘッド K に二つの鉄のキャッチピンが固定され、それらの端は各アーチの両側で突き出ているので、それがスプリングはり U のストップスプリングに当たってピストンの運動を制限し、それが行程の適切な長さを超えるのを防いでいる。

M は主ポンプロッドまたはスピア (槍) であり、レバーの外側の端のアーチヘッドから鎖で吊るされ、ポンプを動かすために鉱山の中へ降りている。ロッド M の重さはピストン J の重さを上回って、優位なつり合い重りを形成しており、ピストンを引き上げて、機関全体を作業行程の間に動かす。注意：鉱山の中のポンプと立坑仕掛けは、既述のもの (第 2 章 p.154 および 第 3 章 p.214) と同じである。

7 は大レバーに固定された小アーチであり、その背後にはもう一つの類似のアーチがあり、制御プラグはり

l を吊り下げる二つの鎖を受けている。二つの鎖の先のロッドは、結合されてプラグの上端に繋がれ、一方、プラグの下端に空気ポンプのロッド l が固定されている。プラグが上下に動作するときそれを安定に保つために、プラグの下端に水平に一本の木片が取り付けられ、この横断木片の両端は、直立した 2 本の柱の中に作られた鉛直の溝の中を、上下に自由に滑る。そのプラグには、制御ギアのハンドルを動かすために、3 個の突き出た木片が固定されていて、そのうちの 2 個が図の 1 と 2 の位置に示されている。

r、s、3、t、u、4 は制御ギアであり、上下の位置 t、u、4 に位置する 3 本の水平軸で構成される。それぞれの軸にはハンドルまたはスパナ r、s、3 が取り付けられ、機関が始動、停止、または調整運転される時には、ハンドルが手動で操作され、また、機関が規則的な動作を行っている時には、同じハンドルがプラグ l のチョック (chock) 1 と 2 により動かされる。制御ギアのそれぞれの軸とハンドルは、適当なレバーとロッドにより、弁 b、e、および i に繋がっている。3 本の軸のピボットは、2 本の直立の柱によって、支えられる。その柱は、凝縮用水槽の上に渡されたはりの上に立てられ、その上端はスプリングはり V の高さまで達している。

R は冷水ポンプであり、機関室の外のタンクまたは立坑から冷水を恒常的に汲み上げ、壁 V を通り抜けた樋により凝縮水槽 G の中へ運ぶ。注意：図の中で、ホットウェル I は樋の端の直ぐ下に表れているが、ホットウェルは樋の背後にあり、樋からの水を受けるのではない。冷水ポンプのロッドは大レバー L から吊り下げられて、動かされる。

S は熱水ポンプであり、機関室の外壁に固定され、大レバー L から吊り下げられた小さいロッドで動かされる。このポンプの吸い込み管は、ホットウェル I から水を引き出して、ポンプ S の頂部の水槽へ上げる。そしてそれは、ボイラに給水する鉛直の給水管 T まで、長い管 8 で運ばれる。

(p.356) T は鉛直の給水管であり、上部が開放されていて、熱水ポンプから管 8 8 により、調整コックを通じて水を受ける。給水管 T の下部はボイラの上を貫通して、水中の底近くまで下りている。

V は、大レバー L の支点つまり運動中心 p を支える主レバー壁である。建屋の他の壁と屋根およびまだ記述していないその他の部品は、図面より自明である。建屋の床と木組みは、大気圧機関 (第 2 章 p.139) とほとんど同じである。機関を建屋に取り付ける方法で、ワット氏が行った主な変更は、シリンダをはりの間に吊るすのではなく、シリンダの底を下方へ固定し、また、ボイラをシリンダの下から横の建屋へ移動して、シリンダ橋脚および凝縮用水槽のための余地を空けたことであった。

X はシリンダ E が置かれる石造りの橋脚であり、機関室の二つの側壁の間を横切って伸びた 2 本の極めて強力な横断はりの上に築かれる。シリンダは橋脚 X の上で、4 本の強力なボルトで下方へ固定され、そのボルトは橋脚とその下のはりを貫通して、その下側でクロスキーで止められる。ボルトの上部は、シリンダの底のフランジをナットで下方へ締めて固定し、シリンダをその基礎の上に強固に保持する。

空気ポンプとコンデンサを含む凝縮用水槽 G は厚板で作られ、シリンダ橋脚の前方に置かれて、建屋を横切る 3 本の強力なはりの上で支えられる。このはりの一つは空気ポンプのすぐ下を通り、その空気ポンプは、水槽の底を下方へ貫通した 2 本のボルトでそのはりへ固定される。

機関をそれ自身で動作するようにための機構 この機構により、機関は補助なく往復運動を行うことができる。

それぞれの弁は縁が円錐形に成形された真ちゅうの円板であり、蒸気の通路となる円形の真ちゅうリングの開口部に正確にはめ合わされる。それぞれの弁は、弁を収める四角形の鉄のボックスの底に置かれる。蒸気の流路を開くには弁が持ち上げられねばならず、流路を閉じるにはその弁座の中へ下ろされなければならない。この目的のために弁のステムつまりスピンドルに歯形ラックが取り付けられ、弁ボックスを横断する短い水平軸の中央に固定されたセクター歯車により持ち上げられる。その水平軸の一端はボックスの外へ突き出て、自

由に回転して且つ漏れが生じないように側面のソケットに正確にはめ合わされている。そのボックスの外の軸先端にレバーが取り付けられ、制御ギアの別のレバーの一つにロッドで繋がれてボックスの側面から弁が開閉される。

機関を往復運動させるために継続的に開閉されなければならない弁は、総計 4 個である。すなわち "膨張弁" と呼ばれる上部の蒸気弁 b、"平衡弁" と呼ばれる下部の蒸気弁 e、"排気弁" と呼ばれる下部の弁 i、および "噴射弁" と呼ばれる水槽内の小さい弁 j である。

これらの弁は、それぞれ異なる軸 t、u、4 に固定された三つのハンドル r、s、3 により開閉される (図 7 の拡大図参照)。そのハンドルはそれらの軸から外へ突き出て、プラグはり 1 の側面に隣接して配置されていて、そのため、図の 1 と 2 に示すように、プラグから大きく横へ突き出たチョックと呼ばれている木片により、それらのハンドルが動かされる*26。

それぞれの軸には短いレバーが取り付けられていて、その端は、小さいロッドにより各弁ボックスの外側で弁レバーに繋がれている。弁レバーは、弁ボックスの中に繋がる軸とセクター歯車およびラックにより弁を開閉する。

(p.357) 各ハンドルの軸には別の短いレバーも取り付けられていて、その端から重りがロッドで吊り下げられている。これらのレバーは、重りがそれぞれの軸とハンドルを常に弁の開く方向へ回すように配置されている。最後に、それぞれのレバーには適当なキャッチが準備されていて、重りが持ち上げられて弁が閉じられたときキャッチがレバーを引き留めて弁を閉じ続けるが、キャッチ*27を外すと重りが落下して直ちに弁を開く。

左側*28の上部のハンドル r は、"膨張ハンドル" と呼ばれている。それがプラグで押し下げられると弁が閉じ、また、重りの作用によりそれが持ち上げられると弁が開く。

右側の中央のハンドル s は、"排気ハンドル" と呼ばれている。それがプラグで押し下げられると弁が閉じ、また、それが重りにより上げられると弁が開く。

左側の下部のハンドル 3 は、"平衡ハンドル" と呼ばれている。それがプラグで持ち上げられると弁が閉じ、また、重りにより下げられると弁が開く。

噴射弁 j は、中央の軸 u のまわりに巻かれた紐によりで開かれ、その紐にはそれから弁へ降りているワイヤーが結ばれている。そのために、排気ハンドル s がその重りにより急に上げられて排気弁 i を開く時、ひもは巻き付けられて、また噴射弁 g を開く。

噴射弁 j は、コンデンサの中で上向きに曲がった短い管の先端の開口部を閉じるために使われている。その管の弁とコンデンサの間には、管路を一時遮断するコックが付いていて、作業行程で弁が開いている間の噴射水の供給量を調整する。このコックは、機関が運転中の間は常に開いているが、機関が動作を停止した時は、コンデンサが水で満たされるのを防ぐために、閉じられなければならない。

*26 (訳注) それぞれのハンドルと軸、弁の対応をまとめると、下表ようになる (図 7 参照)。

ハンドル	軸	弁
↑開 膨張ハンドル r	t	膨張弁 b
↑開 排気ハンドル s	u	排気弁 i
↑開	u	噴射弁 j
↓開 平衡ハンドル 3	4	平衡弁 e

*27 (訳注) キャッチ (catch) またはデテント (detent) は、レバーや軸のある位置で軽く保持する機構を指していると思える。外部から少し力を加えると保持が外れて、レバーや軸は移動または回転する。p.359 本文中にも記述があるが、それ以上の説明はない。

*28 (訳注) シリンダからポンプの方向を見て左側

4.2 ワット氏の単動機関の動作

準備 機関が停止している静止位置では、ポンプロッド M またはつり合い重りの重さの優位性により、図 6 のようにピストンは常にシリンダの上部に引き上げられ、空気ポンプのバケットもその胴の頂上に位置し、そして、全ての弁は閉じられている。

ボイラ C の下の A の火床で、火が焚かれるとする。そして、上部の二つのハンドル r と s が押し下げられ、下部のハンドル 3 が持ち上げられることにより、全ての弁 b、e、i および j は閉じられているとする。蒸気が十分に熱せられて機関が動作する準備ができるまで、それぞれの弁のキャッチはハンドルをその位置で捕まえて、弁を閉じているであろう。

機関を始動する準備のために、三つの弁 b、e および i のすべてが同時に開けられねばならない。これは、それらの複数のキャッチからハンドルを外すことにより行なわれ、重りが弁を直ちに開く。そして、弁 b を通って蒸気がシリンダ頂部へ入り、管 d により下の蒸気弁 e と分岐管 f を通ってシリンダ底部へ入る。また、排気弁 i および排気管 g を通ってコンデンサ F の中へも入る。

最初は金属部品が冷たいため、入ってくる蒸気はすべて凝縮する。蒸気が接触するすべての鉄が沸騰する水の温度近くになるまで、ボイラから蒸気が高速で流れて来て、シリンダとコンデンサに到達するや否や凝縮する。しかし、部品が熱くなると、蒸気はシリンダと配管の中で、ボイラの中とほぼ同じ力を得るであろう。そのため、それは機関のすべての空洞部を占め始め、最初は弁ボックス、次にコンデンサ、配管、そして最後にシリンダから空気を追い出してそれに置き換わる。この空気は、漏らし弁つまりブロー弁 x を通って排出される。ブロー弁は、大きい水槽 G の横に付けられた小さい水槽の中で水で覆われている。なぜならば、それが水で覆われていなければ、気密を保てる程度にその弁を正確にはめ合わせるの難しいからである。

(p.358) 蒸気によりこの弁を通して空気が排出されるのは、ニューコメン機関の場合のように毎行程ではなく、機関を動かすための最初の設定時だけである。この操作は、それが出すバブル音のために"ブロー (blowing through)"と呼ばれている。シリンダと他の部品が適当に熱せられて、そこから空気が排出されたとき、漏らし弁 x から非常にスマートなカタカタという音が聞こえる。この音は、空気が全て出て行ったとき、小さい水槽内の水が、出てくる蒸気を急速に凝縮することにより引き起こされる。

このブローを 2, 3 回繰り返すことにより機関から空気が除去され、上部の二つのハンドル r、s を押し下げ、下部のハンドル 3 を持ち上げてそれらをキャッチで保持することにより、三つの弁はすべて閉じられる。このときボイラからの蒸気の更なる供給は遮られ、シリンダからコンデンサへの蒸気の流路は閉じられる。コ

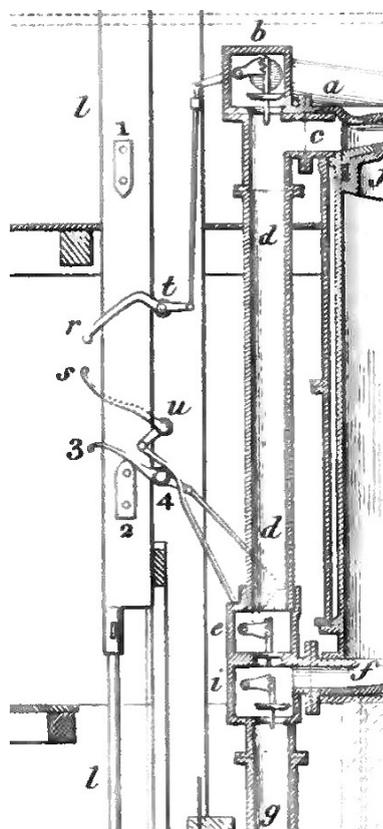


図 7 ワット氏の単動機関の制御ギア詳細

ンデンサの冷たい表面がなおも蒸気を凝縮し続けるので、シリンダはピストンの上も下も共に蒸気で満たされる一方、コンデンサ内では直ぐに真空が作られるであろう。コンデンサ内の真空は、外部から冷水で冷やされるだけの時は数秒以内で完全となり、コンデンサ内へ冷水噴射して蒸気と混合する時はより急速に達成される。

作業行程の間の動作 この状態で、機関は直ちに始動する準備ができています。キャッチを放して対応する重りにより上部の二つのハンドル r と s を上げることにより、膨張弁 b、排気弁 i および噴射弁 j がすべて一度に開かれる。膨張弁 b はシリンダの頂部へ蒸気を入れてピストンを押し、一方、排気弁は既にシリンダの下部にある蒸気を真空のコンデンサの中へ流出させる。噴射弁は、排気弁と同時に持ち上げられる。そして、噴射弁が開かれてコンデンサ内に冷水が噴射され、シリンダから蒸気が入ってくると直ちにそれを凝縮する。そのため、シリンダ下部の蒸気のほとんどすべてが、瞬時に引き出されて凝縮される。ピストンの上方の蒸気の圧力は、下部のほとんど感知されない圧力とはつり合わないで、ピストンは下方へ押されてポンプバケツトとポンプ内の水柱とを引き上げる。これら水柱の抵抗力に対してピストンを下げる力の大きさに応じて、その速度が決まる。

ピストンがその行程の約半分ほど降下すると、プラグ l のチョック 1 が膨張ハンドル r に当たり、それを押し下げてボイラからの蒸気を締め切る。チョック 1 が作用するハンドルのその部分は、弁が閉じられたとき鉛直となる。プラグが更に下がってもチョックはハンドルの鉛直の直線部分に沿って滑るように、ハンドルは途中で折れ曲がっているため、下げられたハンドルは同じ位置を維持して、弁を閉じた状態に保つ。したがって、最初にシリンダ内に入れられた量の蒸気の膨張により、ピストンは降下を続ける。しかし、その行程の底に到着すると、プラグ l の反対側の他のチョック 2 が中央のハンドル s をつかんで、それを押し下げて排気弁 i を閉じる。また、紐とロッドにより、噴射弁 j も閉じられる。

(p.359) ハンドル s をその場所に保持しているキャッチはハンドル 3 を保持しているキャッチと繋がっていて、ハンドル s をラッチする動作の中で他方のハンドル 3 がそのキャッチから放され、そのため、その重りにより落下して平衡弁 e を迅速に開く。

戻り行程の間の動作 この行程開始時の機関の動作位置は、中央の排気ハンドル s はキャッチつまりデテント (detent; 戻り止め) により下に保持され、排気弁 i は閉じられているであろう。膨張弁 b のハンドル r もまた、直前のピストンの降下行程の後半で閉じた状態に保たれていて、そのまま、同じチョック 1 で下に保持されている。この状況の下で平衡弁 e が開かれてシリンダの頂部と底部が自由につながり、シリンダ上部の蒸気が配管 d の中を流れてシリンダ下部の中へ速く入ることができるので、ピストンはつり合い重り M の作用により自由に上がることができる。

ピストンがこのようにシリンダ頂部へ向かう行程の約半分上昇した時、プラグのチョック 1 が膨張ハンドル r を離れる。しかし、ピストンが図のようにシリンダの頂部近くに到着するまでは、そのキャッチがハンドルを下へ押さえているので、このハンドルはそれ自身の重りにより上がって上部の膨張弁を開けることができない。その後、プラグ l に固定された三番目のチョック 2 が下部のハンドル 3 を上げて平衡弁 e を閉じる。そして、ピストンが完全に上がったとき、プラグのもう一つの小さいピンが他の二つのハンドル r と s を止めているキャッチを離し、この結果、図のようにこれらのハンドルの重りがそれらのハンドルを上げて、排気弁 i と噴射弁 j を開き、平衡弁 e が閉じられた直後に膨張弁 b を開く。

作業行程の復元 ボイラからの蒸気が入ってきてピストンの上面を押し、一方、ピストンの下方のシリンダ下部の蒸気がコンデンサへ流出し、そこで冷水噴射により凝縮されてシリンダ下部で真空が形成され、蒸気が

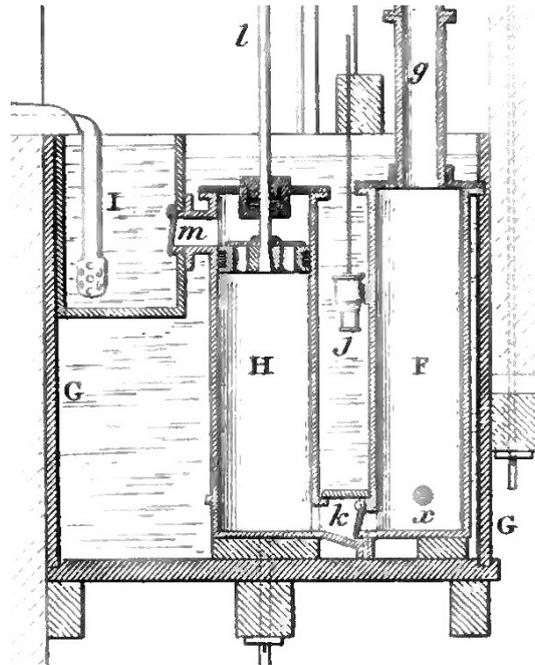


図 8 ワット氏の単動機関の空気ポンプ詳細

ピストンを押し下げて次の行程を行う。

行程の $\frac{1}{2}$ 降下した所で、前回のようにプラグのチョック 1 が上部ハンドル r を押し下げて保持し、膨張弁 b を閉じて保持する。そして、ピストンが底に到着した時、プラグが中央のハンドル s を押し下げて噴射弁と排気弁を閉じる。そして、捕えようとする際にそれが下部のハンドル 3 のキャッチを外し、その重りが平衡弁 i を開ける。

それから、ピストンはつり合い重りにより上がり、その行程の頂部に来たときプラグは下部のハンドル 3 を持ち上げ、平衡弁を閉じて二つの他のハンドルも放して膨張弁、排気弁および噴射弁を開ける。これにより前のようにピストンがもう一度降下し、このようにして機関はその動作を続ける。

空気ポンプの動作 機関が 1、2 行程行うまで、空気ポンプ H の動作は行われない。そのとき、凝縮した蒸気と噴射水がコンデンサの中にある程度の量溜まっているであろうし、また、漏洩して入ったか、または沸騰する水から抽出された空気も同様であろう。ポンプのバケットがその行程の底へ下がるたびに、胴の底に含まれる水の中に浸かり、その水の一部がバケットの弁を通過する。バケットが引き上げられるときその弁が閉まり、バケットの上のすべての水は胴の頂部まで引き上げられ、そこで、吐き出し弁 m を通ってホットウェルの中へ押し出される。

バケットを引き上げると、その下のポンプ胴の中に同時に真空を作り出す。コンデンサ F に空気または蒸気が含まれているとすれば、ポンプ胴の中のこのような真空はコンデンサの真空より完全であり、そのため、その空気と蒸気はその弾性により、コンデンサの下部に溜まった水面を押し付け、フット弁 k を通して空気ポンプの胴 H の下の部分の中へ水を押し出す。そして、このようにコンデンサからすべての水が押し出された後、コンデンサ内の空気または弾性蒸気の一部がその水に続いてポンプ内へ入り、ポンプ胴のバケットの下の真空のスペースが、コンデンサとほぼ同じ弾性の蒸気で満たされる。

(p.360) これは、図 8 のようにポンプバケットが胴の頂部に来た時に生じる。そして、バケットの降下によりその下方の空間は減少し、希薄になっている蒸気は圧縮されて十分な弾性を持つようになり、まず吊り下がったフット弁 k を閉じ、次にバケット内の弁を持ち上げて、そこを通過して胴のバケットの上の空間へ入る。そして、バケットが最も低い位置へ下がったとき、胴の底に含まれている水は k を通って逃げる事ができないで、バケットの弁を上へ通り抜けて、バケットの上側へ出ざるを得ない。そして、バケットが上昇する時その前方にあるこの空気と水を運び上げ、バケットが上昇するにつれてその上の胴内の空間は減少し、含まれる希薄な蒸気または空気はより狭い空間に押し込まれて圧縮され、大気圧の空気と等しい弾性を持つようになり、そして、吐き出し弁 m を通ってホットウェルの中へ急速に出て行き、それに続いて水が出て行く。

前述のとおり、バケットの上昇により胴の中のバケットの下方に真空を作り出す。そのため、コンデンサの空気または蒸気の一部がその真空の中に膨張し、次の行程でバケットで排出される準備ができる。バケットが下り始めるとすぐに吐き出し弁 m が閉じて、熱い水または空気がポンプ内へ戻ってバケットの上面を押すのを防ぐ。

コンデンサ内の蒸気が非常に希薄であって、大気の圧力に等しい弾性になるためには、ポンプの胴の全容積が数立方インチに圧縮されねばならないような場合でも、上記の操作によりコンデンサ内の蒸気は除去される。この空気の量がたとえ少量であったとしても、ポンプのバケットの上に乗っている水がポンプ頂部の空気全体を追い出して、それに続いて水自身が出て行くので、この少量の空気は吐き出し弁 m により有効に排出されるであろう。

冷水ポンプの動作 冷水ポンプ R は、凝縮用水槽 G に十分な冷水を供給するものであり、水槽の中に残る水の温度を上げることなく、凝縮される蒸気のすべての熱を吸収して持ち去る。

熱の主な部分はコンデンサ内へ噴射される冷水により吸収され、その冷水は 96 度から 110 度の温度の熱水となって、空気ポンプでホットウェルへ放出される。ボイラからの蒸発量を補うのに必要な量の熱水が、このホットウェルから熱水ポンプ S で引き出され、また、余った熱水はオーバーフロー管と排水管により、ホットウェルから排出される。その排水は、凝縮用水槽の冷水やポンプ R でくみ上げられる坑道内の冷水と混ざらないように、機関から全く離れた場所へ運ばれるようにしなければならない。

凝縮用水槽 G へ揚水するために冷水ポンプが使用され、噴射に必要とされるよりかなり多い水を上げ、ホットウェルと同じくオーバーフロー管により、水槽 G から冷水の余剰量を連続的に連続的に流出させる。このように熱水を冷水から切り離して、双方とも余剰量をオーバーフローさせることにより、コンデンサを囲んでかつ噴射水としても利用する水は、極めて冷たい状態に保たれる。これは、機関を高性能とするために必須の条件である。

(p.361) 熱水ポンプ S がホットウェルから引き上げる水は、ポンプの頂部の水槽から長い水平管とコック 8 8 により鉛直の給水管 T へ運ばれ、その給水管によりボイラの底近くへ入れられる。熱水ポンプはボイラが必要とするよりかなり多い水を上げるよう計算されていて、そして、余った量はポンプの頂部の水槽から、オーバーフロー管で共通の排水ドレン管へ流される。ボイラへ適量の水を供給してその水位を常に同じ高さに保つように、水平管 8 の給水コックが機関士により調節されなければならない。

4.3 機関の管理

機関士は定期的に火に新しい石炭を供給し、また時折、火格子の下から火格子棒の間をフックでかいて、空気の自由な流入を妨げる障害物を取り除いて、火をできる限り規則的に維持しなければならない。彼はまた、

機関が必要とする火力に応じて、ダンパー w でドラフトを調整しなければならない。火格子はどんな場合でも均一に広げられた燃料の薄い層で覆われるべきであり、塊状に堆積するように投入してはならない。そして、燃焼の速さを空気のドラフトにより調整しなければならず、したがって、蒸気がボイラに溜まればダンパー w を下げ、また、蒸気が不足すればダンパを上げねばならない^{*29}。

機関士が主に留意すべき事項は、機関の定常で規則的な運動を維持することであり、機関が意図した行程長さ一杯に常に動作し、また、その行程長を越えてストップスプリングのキャッチピンを打ち付けることがないようにしなければならない。この任務をそれ相当に遂行するには、火および制御ギアに常に注意を払うことを必要とする。

彼は燃料を供給してダンパーを調整することにより火をうまく管理し、蒸気はその弾性を変えることなく常に同じ値を保つように管理しなければならない。また、彼はプラグ l のチョックとピンを調節して、機関がその仕事を行うのに必要な蒸気を供給できるようにしなければならない。しかし、その蒸気量は、必要とされる量以上であっても以下であってもいけない。なぜなら、過剰となった蒸気はすべて損失であり、キャッチ・ピンのスプリングへの激しくかつ危険な打撃を引き起こす原因になり、また、蒸気のなんらかの不足はあるべき行程長からの不足を引き起こし、それにより機関の有効な性能を減らすからである。

作業行程を完全に遂行するための蒸気は、その行程のはじめの $\frac{1}{2}$ または $\frac{2}{3}$ の間だけシリンダに供給されることを考えるとき、この留意事項の必要性は明白である。その時、運動がうまく完結するかどうかは、開始の仕方により決定される。蒸気はその全ての力をピストンに及ぼしている間、それはピストンを非常に速く運動させようとするが、すべての可動部品の慣性が運動の急激な伝達に抵抗して、運動が緩慢に生じるように作用する。

これらの状況の下で生じる運動は、加速の法則により開始されて継続される。その法則は、もし行程の間を通して力が継続しているとすると、ピストンに非常に大きい危険な速さを与えることになるであろう。しかし、その過程の適当な段階で蒸気の供給が遮られると、加速の継続に終止符が打たれる。そして、蒸気がそれ自身の膨張作用によりピストンに対して行なう更なる効果は、その強さが次第に減少し、供給を停止した瞬間にピストンが獲得していた運動の比率を継続できなくなる。その結果、速度は遅くなり、最後にピストンが停止する。

(p.362) この減速過程の間、可動部分のエネルギーは、当初運動の開始に抵抗したのと同じくその運動の継続を保ち続けようとする。そして、停止に至るまでに、その可動部分は以前の動かされる時に吸収したすべてのパワーを忠実に返還する。

同じ原理が、作業行程と同様に戻り行程に対しても当てはまる。大気圧機関に対してと同じくワット氏の機関でも、つり合い重りまたはポンプロッド重量が優位となるように設定されており、通常、それはピストンの 1 平方インチあたり 1 ないし $1\frac{1}{2}$ ポンドの割合である (第 2 章 pp.144、176、187 および 202 を参照)。しかし、つり合い重りをこのように設定しても、ワット氏の機関は、ニューコメン機関よりその戻り行程をより迅速に行なうことができた^{*30}。このことは、たとえ戻り行程をより短時間でなう必要がなかったとしても、かなりの利点である。可動部分の慣性はより早く乗り越えられ、機関はより素早く戻りの動作に移ることがで

^{*29} その後、ダンパーの調整は、機関運転員が注意を払わなくてもよいように、蒸気自身の力により行われるようになった。その方法により、ダンパーははるかに良好に制御されるようになった。このことは後述されるであろう。

^{*30} この理由は、ワット氏の機関では、ピストンは戻りの行程の間に、管 d と平衡弁 e により蒸気をシリンダの上部からシリンダの底へ移動するだけであるので、わずかに抵抗が働くだけであるからである。ここで、流路をこのように通る蒸気量は、凝縮により失われないので、同じサイズのニューコメン機関で調整器を通らねばならない量の半分以上を超えない。それゆえに、双方の場合で両者の弁の開口部と調整器のそれとが等しければ、ワット氏の機関では、戻り行程はニューコメン機関より、かなりより容易に実行されるであろう (第 2 章 p.180 を参照)。

きるからである。

非常に長いポンプロッドを持つ機関では、その重さしたがって運動部分のエネルギーが当然非常に大きい値となる(第2章 p.175 を参照)。これは、ワット氏の膨張機関の動作にとって、作業行程の終端に向かって膨張が生じる間の蒸気の作用を均一化する傾向を生み出すので、ある程度有利となる。しかし、その可動部分のエネルギーは戻り行程でも作業行程と同程度に大きくなり、ピストンがコースの頂上近くへ到達する時、キャッチピンをたたくことなく静かに静止するようにするためには、ピストンの運動を抑制するための何らかの工夫が必要である。

これは、ピストンがその行程の頂部に達する前に平衡弁 c を閉じて、シリンダの頂部から底部へのそれ以降の蒸気の通過を遮ることにより実現できる。そのように弁が閉じられた後、ピストンはつり合いの状態にあるのをやめて、つり合い重りの重量に可動部品の慣性作用が加わって更に上まで上昇した時、ピストンはその上のシリンダ内の蒸気を狭い空間に圧縮して、より高密度にしなければならない。同時に、シリンダの下部に含まれる蒸気の部分は、より大きい空間に膨張してより希薄にならねばならない。

蒸気がそのような圧縮に対抗して生み出す抵抗は、ピストンの運動の継続を妨げ、何の衝撃も伴わずに、可能な限りの最も簡単な方法でピストンを静止させる。事実、ピストンは、シリンダの頂部に含まれた弾性蒸気の枕に衝突すると言えるかも知れない。それは、キャッチピンの打撃を受けるために使用されるストップスプリングよりも、比較できないほど弾力性のある緩衝材である。

ピストンの上昇を止めるこの方法では、パワーは失われない。なぜなら、可動部分から引き出されるすべての勢いは、それらを静止させる動作の中で、ピストンの下方の蒸気を希薄にして上方の蒸気を圧縮することに有効に利用されるからである。これらはピストンが下方へ戻るための最適の準備である。なぜなら、コンデンサへ排出されることになるピストンの下方の蒸気量はより少なくなり、また、再度ピストンを押し下げることになるその上方の蒸気量はより多くなって、したがって、ピストンが頂部に到着するまで平衡弁が開いて置かれたとした場合に比べて、必要とされるボイラからの新鮮な蒸気量は、より少なくなるからである。

(p.363) この種類の機関は、その部品の重さとその運動の速さのために、大きいエネルギーを持つので、ピストンが頂部に到達する少し前に平衡弁が閉じられねばならず、その場合、シリンダ上部の蒸気は圧縮されて、ボイラの中と等しい弾性になり、膨張弁 b を持ち上げてボイラへ戻るようになるかもしれない。実際、シリンダ上部の蒸気はピストンにより押し戻されて、次の行程で給気として取り出される蒸気の蓄えの増加となる^{*31}。このようにしてワット氏は、非常に大きい質量の物体が反対方向へ運動を変えることにより生じる主要な弊害を、非常に単純な手段で避けた。

制御ギアの調整 このための根本的な条件は、以下のとおりである。作業行程の開始時にシリンダ(の上側)に供給する蒸気量は、蒸気の膨張作用を助ける中で、可動部分の中に過不足なく正確に作業行程を終了できるような運動エネルギーを作り出して、それ自身で膨張して運動を続けることができる程度の蒸気量とされるべきである。また、戻りの行程ではその終了時に向かって、シリンダの下部へ蒸気が移動するのを抑制して、つり合い重りがピストンの上側に残された蒸気を圧縮するのを助ける中で、可動部分の全運動エネルギーを使い果たすようにするべきである。

実験によってこれらの調整を行うには、ほとんどスキルを必要としない。制御ギアのハンドルに作用する

^{*31} ボイラからの蒸気の弾性力に対抗してつり合い重りによりピストンを引き上げるというこの方法は、ワット氏の 1782 年の第 3 の特許の中で推奨されている (p.348 を参照)。注意：ピストンがその行程を終了する前に蒸気の通過を締め切り、蒸気の膨張によりピストンを静止するのは、ワット氏に特有のものではない。大気圧機関は、そのような方法で調整されていた (第 2 章 pp.148、179、181 および 210 を参照)。実際、そうしなければ、キャッチ・ピンが毎回スプリングを打ちつけたので、そのようにしなければならなかった。

チョック 1 と 2 は、プラグ 1 の平らな側にねじボルトにより固定する。そのボルトをチョックの矩形の穴または切れ込みを通して、チョックをハンマーで軽くたたくことにより、それがプラグの上で任意に動き、かつ、ボルトの圧力でチョックがその位置で留まるように、適度に締めつける。

機関を最初に動作するように設定するとき、機関の状態が確認されるまで、弁類は手動で非常に注意深く徐々に開閉し、チョックの適切な位置を大まかに決定する。その後、もし、ピストンがその予定された下端までまったく届いていないのであれば、膨張ハンドル r 用のチョック 1 をプラグのより高い位置へ上げて、チョック 1 がそのハンドルに早く当たらないようにしなければならない。そうすれば、蒸気弁をより長く開いて置くことになり、シリンダにより多くの蒸気を供給することになるであろう。他方、ピストンが低過ぎる位置まで届いてスプリングの上のキャッチ・ピンを打つのであれば、チョック 1 をプラグのより低い位置に設置して、より早くハンドルに当てて弁を閉じなければならない。

同様に、もしピストンが十分に高く上がらないのであれば、平衡ハンドルを上げるためのチョック 2 は、プラグ上のより低い位置に設置されなければならない。または、ピストンが高く上がり過ぎるのであれば、そのチョックをより高い位置に移さなければならない。そのように移して、ピストンがその行程の頂部に到達するかなり前に平衡弁が閉じて、機関の固有の運動(勢い)によりピストンがちょうどその正確な上端まで届いて、勢いがそこで消費され切るようにしなければならない。

(p.364) これらの方法により機関の運動を調整することにより、機関が打ち勝つべき抵抗にそのパワーを適合させる。そして、その抵抗に何らかの変更が起こる時はいつでも、機関士は膨張ハンドルおよび平衡ハンドルのためのチョックの位置を、対応するように調節しなければならない。もし、ポンプの空気吸引またはポンプの弁の故障により大きな突発的な変化が起こると、キャッチピンがスプリングを打ちつけるであろう。しかし、そのような事故を絶えず警戒し、激しい衝撃が継続しないように、すぐにハンドルのところへ行くことは機関士の義務である。弁は重りにより開かれてプラグで閉じられ、常にハンドルの制御下にあるので、それらはいつでも手動で開閉できる。

手動で機関を動かすには、機関士は左手で平衡ハンドル 3 を、右手で排気ハンドル s をつかみ、そして、これらを動かすことにより、機関の運動の全ての指令を行うことができる。プラグが彼のすぐ前にあるので、それにより、彼はいつ機関の運動が速くなり過ぎたかを見ることができ、そして、彼が専門家であれば、危険な強打に見舞われる前にその速度増加を修正することができるであろう。

立坑から水がポンプでほぼ汲み上げ終わるとき、ポンプが空気を吸い込むと予想され、やがて、事故を避けるために機関士は機関の行程長を短くしなければならない。この目的のために、プラグにはちょうど膨張チョック 1 の下端のすぐ下にピン穴があり、そして、この穴にピンを入れると膨張弁を通常よりかなり早く閉じるので、ピストンのエネルギーは危険を避けるのに必要なだけ減少するであろう。このピンはプラグが動いている間に簡単に挿入することができ、ピンを挿入してピストンをある程度麻痺させ、完全に下端へ達するだけのエネルギーを持たないようにすることができる。このために、プラグの他方のチョックは排気ハンドル s を押し下げするのに十分な位置まで下らない。したがって、機関士は彼の考えにより、その排気ハンドルを下げてもまた下げなくてもよい。このようにして、機関士は彼自身で排気弁を閉じて平衡弁を開くことができ、そのことによりピストンが行程の底へ達する前に、ピストンを戻らせることができる。そして、彼が平衡ハンドルをも持つのであれば、必要な場合にはそれが開くのを防ぐこともでき、また、ゆっくりまたは部分的に開くこともできる。このように準備することにより、ポンプが空気を吸い込んだとしても、彼はどんな悪影響をも防ぐことができる。

平衡弁 e を閉じたままに保持するキャッチを用いずにワット氏の機関を運転することは、極めて普通に行われている。既に述べたように、その重りはハンドル 3 を押し下げて弁 e を開くが、弁の上の蒸気の圧力は

重りに対抗して弁を閉じておくのに十分である。たとえば、ピストンがそのコースの頂上近くに到達する時、プラグのチョック 2 は平衡ハンドル 3 を上げて重りを持ち上げ、平衡弁 e を閉じる。そして、ピストンが完全に上がった時、プラグについているピンが膨張弁と排気弁のキャッチを外すので、それらの弁は重りにより開かれ、シリンダを排気してピストンを押し下げるであろう。この状態では平衡弁の下は真空となり、平衡弁の上にはボイラからの蒸気の圧力が作用する。それにより平衡弁は、重りがそれを開けようとするにもかかわらず、非常に確実に下へ押しつけられる。しかし、ピストンが下がると膨張弁 b が閉じられ、その後、シリンダの上部と管 d の中の蒸気の弾性は次第に弱くなり、弁 e を押す力は次第に弱くなり、遂にはその圧力は重りを支えきれなくなり、そして重りが弁を開いてピストンを戻らせる。

このように、弁の開放はピストンの運動によるのではなく、その上の蒸気が及ぼす圧力により調整されることは明らかであり、弁に対して作用する重りを増減することによりその開放を速くしたり遅くしたりできる。しかし、通常の運転コースでは、ピストンがそのコースの底に達してピストンの戻り行程の準備のために排気ハンドルを押し下げて排気弁を閉じるまで、平衡弁はがそれ自体で開くことはない。

(p.365) 機関がそのように調整されているとき、最初に述べたように、その機関はまるで平衡弁がキャッチによって閉じられているかのように動作する。しかし、偶然的な要因により機関の動作が乱されるときは、平衡弁はピストンがそのコースの底に達する前に開くであろう。たとえば、ポンプのバケットの弁が破損すると抵抗が減少するので、ピストンは非常に高速で下降するであろうが、蒸気が膨張弁の中を流れてその弁が閉じられるまでの時間はより短くなるので、シリンダに入る蒸気の給気量は通常より少なくなるであろう。そして、この減少した蒸気給気が膨張することにより、重りが平衡弁を開けようとするのにより早く対抗できなくなるであろう。この場合、そのことにより平衡弁は排気弁が閉じられる前に開かれ、そして、このために蒸気はシリンダの上部からコンデンサへ引き出されるであろう。これは、ピストンが降下する力の激しさを減らす傾向を持つ。

カタラクト 鉱山を排水するためのワット氏の機関は、ニューコメン機関と同様に適用可能なカタラクトを用いて頻繁に運転される。そのカタラクトは p.189 (第 2 章) で示された方法で作られ、そのワイヤーまたはチェーンは制御ギアの膨張弁と排気弁のキャッチに繋がれ、それらの弁を重りが開かないようにする。この場合、それらのキャッチを離す目的でプラグに付けられているピンは、取り外されなければならない。その結果、ピストンがそのコースの頂部に到達した時、カタラクトが倒れてキャッチを離すまで、ピストンはそこで待機するであろう。その後機関は作業行程、戻り行程を実行し、そして、カタラクトが落下して次の往復運動を引き起こすまで再びそこで待機する。カタラクトに代わるもう一つの方法は、立坑の水の表面にフロートを置くものである。それは p.224 (第 3 章) で描いたのと同じ方法であるが、機関室に導くのにコードの代わりに強い銅のワイヤーが用いられる。このワイヤーの端は膨張ハンドルと排気ハンドルのキャッチに繋がれていて、立坑の中にポンプに供給する十分な水が蓄積される時はいつでも、フロートが上昇してそのキャッチを外し、機関がその行程を開始することになる。この方法では、機関の動作は時間に関係なく引き上げられる水の量に常に正確に順応する。

4.4 ワット氏の単動機関の種々の部品の細目

ワット氏は、極めて思慮深く作られた炉で毎分 1 立方フィートの水を沸騰するには、480 平方フィートのボイラ表面が火炎の作用にさらされることが必要であると見出した。その比率では、1 平方フィートの表面は毎分 3.6 立方インチの水を蒸発させることになる。

彼はまた、そのように用いられた 1 ブッシェル (= 84 ポンド) のニューカースル炭は、8 ないし 12 立方フィートの水を沸騰させること、つまり、石炭 1 ポンドにより 6 から 9 ポンドの水^{*32}が蒸発される比率であることを見出した。1 ハンドレッドウェイト (=112 ポンド) のウェンズベリー炭は、ニューカースル炭の 1 ブッシェルに等価であること、つまり、これら 2 種類の石炭の効果の比は (訳注: $\frac{1}{112} : \frac{1}{84} =$) 3 : 4 であることを見いだした。

ワット氏は、彼の機関がピストン 1 平方インチあたり $8\frac{2}{3}$ ポンドの水柱の荷重を受けて、ピストンを毎分 (12 行程 × 8 フィート行程長 =) 96 フィートの速さで動かすとき、それに必要な弾性の蒸気 1 立方フィートを作り出すのに 1 立方インチの水が費やされると見積もった^{*33}。そして彼は、実際の蒸気消費量は、ピストンがその運動において占めるシリンダ容積より $\frac{1}{10}$ だけ大きいと計算した。これは、シリンダの頂部と底部にピストンが通過しない余分の容積があることを考慮するということであった。

(p.366) これらのデータから以下の規則が導かれるが、それらすべてでは、ボイラからの蒸気の供給はピストンがシリンダの底へ達するまで遮断されず、シリンダは濃い蒸気で完全に満たされると仮定している。

ワット氏の蒸気機関のボイラから蒸発する水の量を求めること。

規則：シリンダ直径 (インチ) の 2 乗にピストンの運動 (フィート/分) を掛けて、その積を 288 000 で割る。その商は毎分蒸発する水の量 (立方フィート/分) である。

例：シリンダ直径 48 in の 2 乗 = 2304 円インチ、×(行程長 8 フィートで 12 行程/分 =) 運動 96 フィート/分 = 221184、÷288000 = 蒸発量 0.768 立方フィート/分。

計算式 (訳注) : ^{*34}

蒸気/水の体積比を $12^3 = 1728$ として、蒸気消費量 = $1.1 \times$ (毎分のシリンダ容積) より、

$$\begin{aligned} (\text{蒸発水量 [ft}^3/\text{min]}) &= 1.1 \times \frac{\pi}{4} \left\{ \frac{(\text{シリンダ直径 [in]})}{12 \text{ in/ft}} \right\}^2 \times (\text{ピストン速度 [ft/min]}) \times \frac{1}{1728} \\ &= \frac{(\text{シリンダ直径 [in]})^2 \times (\text{ピストン速度 [ft/min]})}{288000} \end{aligned}$$

ワット氏の機関に対して、火炎にさらすことを要するボイラの表面積を求めること。

規則：シリンダ直径 (インチ) の 2 乗にピストンの運動 (フィート/分) を掛けて、その積を 600 で割ると、その商は火炉面積 (平方フィート) である。

例：48 in の 2 乗 = 2304、×96 フィート/分 = 221184、÷600 = 368.64 平方フィート。

計算式 (訳注) :

毎分 1 立方フィートの水を蒸発させるには 480 平方フィートのボイラ伝熱面積が必要であるので、前の規則を用いて、

$$\begin{aligned} (\text{ボイラ伝熱面積 [ft}^2\text{]}) &= (\text{蒸発水量 [ft}^3/\text{min]}) \times 480 \text{ ft}^2/(\text{ft}^3/\text{min}) \\ &= \frac{(\text{シリンダ直径 [in]})^2 \times (\text{ピストン速度 [ft/min]})}{600} \end{aligned}$$

ワット氏の蒸気機関で消費される石炭の量を求めること。

1 ポンドのニューカースル炭が $7\frac{1}{2}$ ポンドの水を沸騰させる、つまり、1 ブッシェルのこの石炭が 10.08 立方フィート^{*35}の水を沸騰させると仮定する。

^{*32} (訳注) 水の密度を 62.5 lb/ft^3 とする。

^{*33} これらの諸元の引用元であるロビンソン博士の "Steam-engines" の報告についての、ワット氏の注釈の中では、ピストンの負荷は摩擦を除外して 1 平方インチあたり近似的に 11 ポンドである、と述べられている。しかし、そこで述べられている他の事実と一致させると、11 ではなく、8.68 ポンドでなければならない。

^{*34} (訳注) 原文では、この部分に下記のような計算尺での計算方法が記載されているが、これらの部分は現在では不要と考えられるので、ここでは「計算式 (訳注)」と記して、計算式を整理して示す。本章の以下の部分でも同様とする。

$$\text{計算尺 } \frac{C}{D} \frac{\text{運動 (ft/min)}}{536.6} \frac{\text{蒸発量 (ft}^3/\text{min)}}{\text{シリンダ直径 (in)}} \quad \text{例 } \frac{C}{D} \frac{96 \text{ (ft/min)}}{536.6} \frac{0.768 \text{ (ft}^3/\text{min)}}{48 \text{ (in)}}$$

^{*35} (訳注) 水の密度を 62.5 lb/ft^3 と仮定。

規則：シリンダ直径（インチ）の 2 乗にピストンの運動（フィート/分）を掛けて、その積を 576 で割ると、その商はニューカースル炭の消費量（ポンド/時間）である。

例：48 in の 2 乗 = 2304、×96 フィート/分 = 221184、÷576 = 石炭 384 ポンド。

計算式（訳注）：

ニューカースル炭 1 lb で 7.5 lb の水を蒸発できるので、水の密度を 62.5 lb/ft³ として、

$$\begin{aligned} (\text{ニューカースル炭消費量 [lb/h]}) &= \frac{(\text{蒸発水量 [ft}^3/\text{min]}) \times 62.5 \text{ lb/ft}^3 \times 60 \text{ min/h}}{7.5 \text{ lb/lb}_{\text{fuel}}} \\ &= \frac{(\text{シリンダ直径 [in]})^2 \times (\text{ピストン速度 [ft/min]})}{576} \end{aligned}$$

ワット氏の機関のパワーを馬力単位で求めること。ピストンの荷重は 1 平方インチあたり 8.68 ポンドであり、蒸気は膨張しないと仮定する^{*36}。

規則：シリンダ直径（インチ）の 2 乗にピストンの運動（フィート/分）を掛けて、その積を 4840 で割ると、その商は機関のパワー（馬力 HP）である。

例：48 in の 2 乗 = 2304、×96 フィート/分 = 221184、÷4840 = 45.6 馬力。

計算式（訳注）：

（ピストンの荷重 [lb]）= 8.68 lb/in² × $\frac{\pi}{4}$ （シリンダ直径 [in]）² であり、1 [HP] = 33000 [lb ft/min] であることより、

$$\begin{aligned} (\text{機関パワー [HP]}) &= \frac{(\text{ピストンの荷重 [lb]}) \times (\text{ピストン速度 [ft/min]})}{33000 \text{ [(lb ft/min)/HP]}} \\ &= \frac{8.68 \text{ lb/in}^2 \times \pi (\text{シリンダ直径 [in]})^2 \times (\text{ピストン速度 [ft/min]})}{4 \times 33000 \text{ [(lb ft/min)/HP]}} \\ &= \frac{(\text{シリンダ直径 [in]})^2 \times (\text{ピストン速度 [ft/min]})}{4840} \end{aligned}$$

（p.367）上のワット氏のデータによると、ワット氏の機関に供給される 1 立方フィートの蒸気は、機関の摩擦および水の運動抵抗に対する力の他に、1 立方フィートの水を高さ 18.18 フィートの高さへ上げるのに必要な真空を作ることができる。なぜなら、1 平方インチあたり 8.68 ポンドの圧力は高さ 20 フィートの水柱の圧力に等しく^{*37}、蒸気消費量はピストンがその運動で占める空間より $\frac{1}{10}$ だけ大きくなければならないので、（20 フィート ÷ 1.1 =）18.18 フィートの効果となる。

1 ブッシェル（= 84 ポンド）の良質のニューカースル炭を消費すると、19.8 ミリオンポンドの水を 1 フィート高さへ上げることができる。つまり、毎時 1 ブッシェルの消費により機関は 10 馬力を出力する。そして、同じ比率で、1 馬力はそのような石炭を毎時 8.4 ポンド必要とする。

証明：1 ブッシェルの石炭は 10.08 立方フィートの水を蒸発させ、1 立方インチの水は 1 立方フィート（= 1728 立方インチ）の蒸気となる。したがって、1 ブッシェルは（10.08 × 1728 =）17418 立方フィートの蒸気を生じる。そして、1 立方フィートの蒸気は 1 立方フィートの水を 18.18 フィートの高さへ上げるので、1 ブッシェルは（17418 × 18.18 =）316 666 立方フィートの水、つまり（×62.5 ポンド =）19 791 625 ポンドを 1 フィートの高さへ上げることになる。

^{*36} 揚水用の機関では、いくらかの膨張作用が必ず伴わなければならない。なぜなら、その行程の終了の少し前に蒸気弁を閉じてその運動を静かに終わらせない限り、可動部分のエネルギーつまり固有の運動（inherent motion）が、その行程の終端でキャッチピンをたたくことなく費やされることはないからである。ここで、ある機関の可動部分の重量がより小さければ、シリンダはより近くまで濃い蒸気で満たすことができ、膨張がないとする上の仮定に近づく。また、クランクとはずみ車で調整される回転機関では、通常、何の膨張も伴わず、行程の終端まで濃い蒸気で動かすことができる。このことは、適当な個所で説明されるであろう。

^{*37}（訳注） $h = \frac{p}{\gamma} = \frac{8.68 \times 12^2 \text{ lb/ft}^2}{62.5 \text{ lb/ft}^3} = 20.00 \text{ ft}$

注意：上の記述は、蒸気弁はピストンが行程の底に達するまで開いており、そのためシリンダは大気圧より少し低い圧力の蒸気、つまり 1 平方インチあたり 14 ポンドの弾性の蒸気で満たされると仮定している。しかし、機関がある所定の比率で膨張して動作するならば、上述の規則で得られた結果を蒸気の体積の膨張倍数で除算しなければならない。

濃い蒸気が膨張する際にその体積が何倍になるか、つまり膨張の程度を表す倍数を求めること。ピストンがその行程の頂上に達したときにその上に残されるシリンダ内の隙間とその流路は、その行程でピストンにより占められる容積の $\frac{1}{10}$ に等しいと仮定する。

規則：全行程のうち濃い蒸気が入られる部分の長さ、全行程長の $\frac{1}{10}$ を加え、これを除数とする。そして、行程の全長にその $\frac{1}{10}$ を加え、その和を先の除数で割る。その商は、膨張を表す倍数である^{*38}。

例：行程長 8 フィートの機関が、その行程の 5 フィートの区間で濃い蒸気を供給されると仮定する。ここで、8 フィート $\div 10 = 0.8$ 、+ 5 フィート = 5.8 が除数となる。そして、8 フィート + 0.8 = 8.8、 $\div 5.8 = 1.518$ 倍となり、これが濃い蒸気が膨張する倍数である。

計算式 (訳注)：

$$(\text{膨張倍数} [-]) = \frac{(\text{行程長 [ft]}) + 0.1 \times (\text{行程長 [ft]})}{(\text{非膨張区間長 [ft]}) + 0.1 \times (\text{行程長 [ft]})}$$

ここで、前の規則により与えられる結果 (p.366 のボイラ蒸発量 0.768 立方フィート/分) を用いる。倍数 1.518 で膨張して動作するとき、この機関による毎分の水の蒸発量は (0.768 $\div 1.518 =$) 0.506 立方フィート、火炎の伝熱面は (368 $\div 1.518 =$) 242 平方フィート^{*39}、そして、時間あたりの石炭消費量は (384 $\div 1.518 =$) 253 ポンドとなる。

(p.368) ある与えられた倍数で膨張して動作するときのワット氏の機関のパワーを求めること。

規則：蒸気が膨張しない場合に機関が行なうパワーを計算して、そのパワーに、濃い蒸気によりピストンが動かされる行程部分の長さを掛けて、その積を行程の全長で割ると、その商は濃い蒸気だけにより行なわれるパワーである。そして、膨張作用の間に余分になされるパワーを見出すために、膨張を表す数の双曲線対数 (自然対数) をとり、それに濃い蒸気によりなされるパワーを掛けると、その積は膨張により得られる追加のパワーである。最後に、二つのパワーの和が機関の全パワーである。

例：上に引用した機関では、何の膨張も行わない場合のパワーは 45.6 馬力であり、 \times 濃い蒸気による行程長 5 フィート = 228、 \div 全行程長 8 フィート = 濃い蒸気だけによるパワー 28.5 馬力となる。膨張倍数は 1.518 で、その双曲線対数は 0.418 であり、 $\times 28.5$ 馬力 = 11.9 馬力 (膨張による追加のパワー) となる。最後に、28.5 + 11.9 = 40.4 馬力 (機関によりなされるパワー) である。

^{*38} この規則は実質的に、その膨張状態で蒸気が占める体積を、膨張開始前の濃厚状態で占めていた体積で割ることである。これを達成するために、両者の体積に関して、ピストンがそのコースの頂上に来た時にシリンダの頂部に残る隙間と流路および蒸気管とを含めなければならない。ピストンは、あらゆる打撃の危険を避けるために、シリンダの頂部または底の 3 ないし 4 インチ以内に近づけてはならず、また、弁に繋がる流路 c の容積も見積もられなければならない。また、膨張弁 b と平衡弁 e の間の直立の蒸気管の容積も、ピストンの上の隙間の一部となる。一般にそれは、ピストンが動く間にそれにより占められる空間の $\frac{1}{10}$ と仮定すれば安全であろう。ある場合にはそれ以上となり、他の場合にはそれ以下となる。隙間が既知であれば上の規則はより正確に適用できる。

^{*39} 膨張原理で動作するよう意図された機関であっても、機関に濃い蒸気をフルに供給するのに十分なサイズのボイラを備えるべきである。また、熱水ポンプと冷水ポンプは、濃い蒸気で動作したときでも適切に機関に給水するように計算されるべきである。なぜなら、膨張原理で動作するときは、このことは何の不都合も引き起こさないであろうからである。

計算式 (訳注) : *40

$$(\text{膨張機関のパワー [HP]}) = (\text{非膨張機関のパワー [HP]}) \times \frac{\text{非膨張区間長 [ft]}}{\text{行程長 [ft]}} \times \{1 + \ln(\text{膨張倍数})\}$$

上に引用した直径 48 インチのシリンダの機関は、このように膨張を伴って動作するとき、スミートン氏の直径 52 インチのシリンダの機関 (第 2 章 p.173 を参照) と同じパワーを発揮する。ニューコメン機関とワット氏の機関の代表例として、両者の比較を表 3 に示す。p.181 (第 2 章) で一つの予想が出されており、おそらく実現可能な最大性能のニューコメン機関である。先の計算は同じサイズのワット氏の機関の実現可能な最大性能であろうと考えられ、少なくとも、実例において、膨張が $1\frac{1}{2}$ または $1\frac{3}{4}$ 倍より大きくなる状況は、p.352 で述べた理由によりほとんどない。

ピストンがその運動で占めることのないシリンダ上下部の隙間は、蒸気の損失の原因となるので、他の状況が許す限り小さくするべきである。ピストンがその下端に達した時にその下に残される隙間は、上端に達した時にその上に残される隙間より小さい。後者では鉛直の蒸気管 d がその隙間の一部となるからである。シリンダ底部の隙間により毎行程引き起こされる蒸気の実際の損失は、その隙間容積を膨張倍数で割ることにより近似的に見出すことができる。なぜなら、その隙間は毎回の作業行程ごとに排気され、戻り行程ごとに膨張した蒸気で再充填されねばならないからである。

たとえば、直径 48 インチ (断面 12.5 平方フィート) のシリンダ内で、長さ 8 フィートの行程を行うピストンは、その運動により 100 立方フィート近くの空間を占める。そして、ピストンが頂部または底部の 4 インチ以内に接近しないと仮

表 3 ニューコメン機関とワット氏の機関の性能比較

40 HP の蒸気機関の性能	ニューコメンの原理 による大気圧機関	ワット氏の原理による蒸気機関	
		膨張なし	倍数 1.518 の膨張
1 hr の石炭消費量	(7.56 bush) 635 lb	(4 bush) 336 lb	(2.98 bush) 250.5 lb
1 HP あたり 1 hr の石炭消費量	15.87 lb	8.4 lb	6.20 lb
石炭 1 ブッシェル (=84 lb) あたり 高さ 1 ft へ上げる水重量	10 500 000 lb	19 800 000 lb	26 600 000 lb
毎分のボイラ蒸発量	1.33 ft ³	0.674 ft ³	0.501 ft ³
毎分の冷水噴射量 (52 deg.)	13.66 ft ³	19.3 ft ³	14.35 ft ³
蒸気 1 ft ³ で水 1 ft ³ を上げる高さ	9.31 ft	18.18 ft	24.43 ft

*40 (訳注) 膨張区間でのパワーを計算する際、ピストン上部の隙間内の蒸気も膨張するが、著者の計算はこれを無視している。これを考慮すると、下記ようになる。
等温膨張として、

$$\begin{aligned} (\text{膨張区間の仕事}) &= P_0(V_h + V_1) \int_{V_h+V_1}^{V_h+V_s} \frac{dV}{V} = P_0(V_h + V_1) \ln \frac{V_h + V_s}{V_h + V_1} \\ &= (\text{非膨張区間の仕事}) \left(1 + \frac{V_h}{V_1}\right) \ln \frac{V_h + V_s}{V_h + V_1} \end{aligned}$$

となる (ただし、 V_h : 上部隙間容積、 V_h : 非膨張区間容積、 V_s : 行程容積)。したがって、膨張機関の全パワーは次式となる。

$$(\text{膨張機関のパワー [HP]}) = (\text{非膨張機関のパワー [HP]}) \times \frac{\text{非膨張区間長 [ft]}}{\text{行程長 [ft]}} \times \left\{1 + \left(1 + \frac{V_h}{V_1}\right) \ln(\text{膨張倍数})\right\}$$

著者は $V_h \ll V_1$ と近似している。

定すると、シリンダの頂部または底部の隙間は約 4 立方フィートとなるであろう。そして、弁までの流路にそれぞれ 1 立方フィートを見込んで、ピストンが下端へ来た時のその下の隙間は 5 立方フィートであるということができる。そして、鉛直の蒸気管 d の容積は 5 立方フィートとして、ピストンが上端に来た時のその上の隙間は、 $(5 + 5 =)$ 10 立方フィートとなるであろう。それは、規則で仮定したように、ピストンの運動により占められる空間の $\frac{1}{10}$ である。

(p.369) 作業行程の終了時に、膨張した状態の蒸気がシリンダ内で占める空間は、 $(100 + 10 =)$ 110 立方フィートである。また、ピストンが 5 フィート下がった時に膨張弁が閉じられたとすると、そのときのシリンダ内の濃い蒸気量は、 $(62.5 + 10 =)$ 72.5 立方フィートである。膨張の倍数は $110 \div 72.5 = 1.518$ 倍となり、p.368 の例で計算したのと同じである。ピストンの下の隙間は 5 立方フィートであり、実際の損失は、濃い蒸気で表して、毎行程で約 $(5 \div 1.518 =)$ 3.29 立方フィートとなり、または、毎分 12 行程であるので、1 分間につき 39.5 立方フィートが失われるであろう。

注意：これは十分に近い値ではあるが、厳密には正しくはない。なぜなら、蒸気がピストンの下の真空の空間に受け入れられるとき、それは $(10 + 100 + 5 =)$ 115 立方フィートを占めなければならず、 $115 \div 72.5 = 1.58$ 倍の膨張となり、蒸気は上で仮定されたものよりさらに膨張させられているからである^{*41}、そして、5 立方フィート空間 $\div 1.58 = 3.16$ 立方フィートの濃い蒸気が、毎行程で実際に失われる。

ピストンの上の隙間は、戻りの行程の間にその空間を満たしていた膨張した蒸気を完全な密度に戻したときの容積に等しい量だけの蒸気の損失を引き起こす。したがって、隙間が 10 立方フィートであり膨張が 1.58 倍であれば、その隙間は $(10 \div 1.58 =)$ 6.32 立方フィートの濃い蒸気を含み、したがって、それを完全な密度まで満たすには、 $(10 - 6.32 =)$ 3.68 立方フィートの濃い蒸気が必要とされる。

それゆえに、この機関の全行程での濃い蒸気の損失は、ピストンの下の隙間により 3.16 立方フィート、上の隙間により 3.68 立方フィートであり、合わせて $= 6.84$ 立方フィートとなる。その行程の 5 フィートをピストンが動くことにより、同時に消費される濃い蒸気量は 62.5 立方フィートであり、前に仮定されたように、実際の消費量がピストンで占められる空間より多くなる量は、極めて $\frac{1}{10}$ に近い。

機関が、膨張を伴わず、濃い蒸気で完全に動作するのであれば、各行程での蒸気の損失はピストンの下の隙間の全包含量であるだろうし、上記の場合では 5 立方フィートである。しかし、ピストンの上の隙間に起因する損失は、そこは完全な密度の蒸気またはそれに非常に近い蒸気で常に満たされているであろうから極めて少ないかまたは全くない。同時に、その全行程を通してのピストンの運動による濃い蒸気の消費は、100 立方フィートであるだろうから、この場合の追加量は、わずか $\frac{1}{20}$ である。

ボイラに接続されている機器 ボイラの水を常に同じ高さに維持することは、機関運転員の第一の任務の一つである。なぜなら、もし、高くなり過ぎるとその水は蒸気管の中を噴霧となって上がり易くなり、シリンダの中へ入る。また、その水面がボイラの下部を巡回している煙道 9 の下まで低下すると、ボイラの金属が損傷するであろう。そして、運転員の怠慢によりボイラを空焚きにしてしまうならば、それはすぐに焼き切れ (burn out) てしまうかもしれない。

給水量は給水管 8 T のコックを回すことにより調整されるが、ボイラ内の正確な水位を知るために、2 本のゲージ管とコック y が用いられる (図 9)。そのうちの 1 本は水が来なければならない高さ、つまり水位レベルにごく近い範囲まで下がり、そして、もう一つはそのレベルより少し下へ下がっている。水が望ましい高さであれば、最初のコック y を開くと蒸気が流出し、他方のコックからは、水面の上にある蒸気の圧力に押されて水が噴出するであろう。しかし、水が両方のコックから出るならばボイラ内の水位は高過ぎであり、蒸気が両方から出るならばそれは低過ぎであろう。これらのコックにより水の状態を頻繁にテストして、それに応じてボイラに必要なだけの給水をするように、給水コックを調整することが機関運転員の任務である。

これらのゲージコックは、セイヴァリ機関およびニューコメン機関で使われたものと同じであるが、ワット氏は彼の機関の中で、ボイラ内の水位を視覚により示すもう一つの種類の水位計を用いた。それは小さい鉛直

^{*41} これは、平衡弁はピストンがそのコースの上端に達するまで閉じられないと仮定しているが、もし機関が p.362 で既述したように調整されていれば、そのときピストンの下の隙間に残る蒸気は更に膨張し、それに応じて損失は減少するであろう。

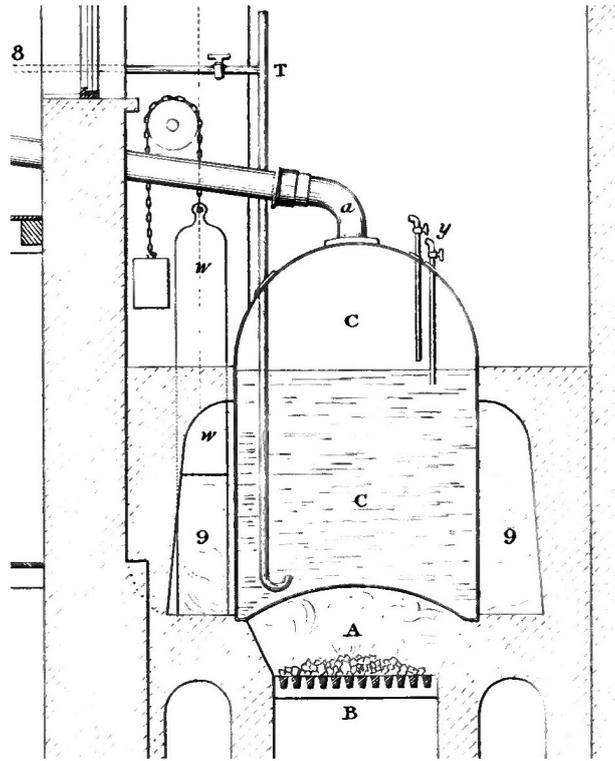


図9 ワット氏の鉱山排水用機関のボイラ (Plate X より)

のガラス管であり、その両端に繋がれた2本の短い銅管でボイラに繋がっていた。その一方の管はガラス管の上端から出てボイラの意図された水位より上の部分へ繋がり、他の管は、ガラス管の底からボイラの水面の下部分へ繋がる。このように作られたガラス管は、ボイラの水と同じレベルまで常に水で満たされることは明白であり、水面が真のレベルよりいくらか高いかまたは低いかわを機関士に知らせるために、インチの目盛りをつけることもできる。この水位計は通常ボイラの端で火炉の上方のレンガ組みの外側に置かれ、小さい銅の管はガラス管の上下端からレンガを貫通していた。それは非常に便利なゲージであったが、ガラス管が破損し易いことから、それ以降は長い間採用されなかった。

(p.370) ボイラの過度の水位低下を音で知らせるために、これらの機関に時々もう一つの有用な水位計が使用された。それは意図した水面の下まで伸びた一本の管であり、その管の上端は建屋の頂上まで延びて、先端が警笛の口金となっている。ボイラの水位が低くなり過ぎるとその管から蒸気が噴き出して、警笛を通過することにより近隣に警告音を発し、機関士が寝入っていたとしても、彼を任務に呼び戻すであろう。これは不注意に対する警戒として役に立ち、蒸気ボイラでは決して省略されるべきではない。それは、スミートン氏により彼の機関で使用された(第2章 p.193 を参照)。

ボイラで水の状態を確認するためのこれらの装置は、ボイラの蒸発に応じて正確に素早く給水する後継の装置により、その必要性は低くなった。その後継の装置では、ボイラの水面上の浮きにより開閉する給水弁を通じて水が供給された。これについては、その時が来れば後述されるであろう。

ボイラにはその最も低い部分から繋がる排水管があり、レンガ組みを貫通して外へ出ている。その端には、コックまたは栓が取り付けられ、時折、水を抜いてボイラを空にする。

ボイラの上部には、マンホールと呼ばれる長円形の開口部がある。機関が動作している時は、これはカバーで覆われてねじで固定されている。しかし、それは容易に取り外すことができ、ボイラの内面に水から付着する堆積物を取り除くために、ボイラの中へ人が入ることができる。このような堆積物はボイラ金属から水への熱の伝達を大きく阻害し、またその金属を破壊する性質を持つので、そのようなすべての堆積物はボイラから常に取り除かれなければならない。

ボイラの中の堆積物は、ボイラ用の純水が得られない多くの状況下では、もっとも深刻な不具合であり、鉱物を溶解して含む水は、しばしばボイラの底に硬い石状のクラスト (crust) を付着させ、それは取り除くのが非常に難しい。そのような場合の唯一の治療法は、頻繁にボイラを清掃し、あらゆる堆積物の蓄積を避けることである。このため、継続して動作することが必要なすべての機関は予備のボイラを持ち、一方が動作している間に他方を清掃することができるようにするべきである。

安全弁 ボイラの蒸気は、大気中の空気よりさほど高い弾性である必要はないが、特に機関が停止しているときなど、何らかの原因で蒸気が強くなり過ぎたりすれば、ボイラを破裂させる危険が生じる。このために、ボイラには荷重をかけた安全弁が備えられている。安全弁の上面に働く大気圧にその荷重の重さを加えたものより、蒸気の弾性が大きくなり過ぎない限り、安全弁は閉じられる。しかし、蒸気の力がボイラにとって危険となる程度に増大すれば、蒸気の圧力は弁の荷重と大気圧とを上回って弁を強制的に開き、蒸気の強さが十分に減少するまで、ボイラから蒸気を流出するであろう。そして、安全弁の荷重が内部の蒸気の圧力を上回れば、安全弁は再び閉じられるであろう。

(p.371) 機関が動作している間、蒸気が蓄積することがないように、燃料の供給とダンパーの開度調整により、火力が調整されなければならない。しかし、機関が停止すると、残りの火が蒸気を作り続けるので、その蒸気は安全弁から放出されなければならない。

安全弁は円形の真ちゅう板であり、その周囲は円錐状に作られ、ボイラ頂部に固定された真ちゅうリングつまり弁座の円錐形開口部にはめ合わされる。その弁の中心を貫通する鉛直の柄 (stem) がソケットに保持され、弁が上下した時にそのソケットにより弁は弁座の正しい位置へガイドされる。弁の上には、機関が動作している時に弁を押さえるのに十分な重りが載せられる。そして、蒸気が遮断されているときに弁を開放するために、等しい長さのアームのある小さい長方形レバーが、弁の横に取り付けられ、弁の柄の最上端に繋がれている。他のアームに鎖が取り付けられて機関室の中へ導かれ、そこでプーリーを介してつりがねの紐のように鉛直に吊り下げられている。機関が停止されたとき、それを引くことにより安全弁が開放される。

火が消されているときボイラの蒸気は冷却されるので、ボイラの中へ空気が入られなければならない。そうしなければボイラの中に真空が形成され、大気圧がその頂部を内側へ押し潰すであろう。もし、安全弁を開いていれば空気が入ってくるが、これを怠ると、上端が開いている給水管 T から空気が入ることができる。後述するように、機関が冷却されているときに空気を入れるための逆向きにされた安全弁が、後年用いられるようになった。

注意：火が最初につけられた時ボイラは冷たく、その上の部分は空気を含んでいるので、水から上がる最初の蒸気によりその空気を置き換えるために、安全弁は全開に保たれるべきである。そして、蒸気が安全弁から大量に流出するのが観測されたとき、蒸気を蓄えて機関を始動する準備のために安全弁は再度下げられる。ボイラ内の空気がこのように事前に安全弁から排出されていないならば、ブロー弁 x により噴き出してすべての空気を排出するには、非常に長い時間がかかるであろう。

蒸気圧力計 安全弁へ加える荷重を調整することにより蒸気の強さを調整でき、ボイラを破裂させるあらゆる危険を避けることができるが、機関士が蒸気を常に同じ弾性に維持するには、それは十分に正確な指示器で

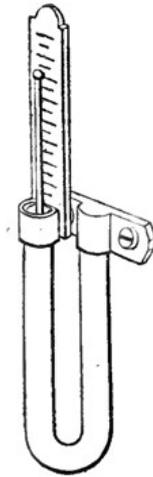


図 10 蒸気圧力計

はない。そのためワット氏は、水銀柱により動作する蒸気圧力計を用いた。この蒸気圧力計は、上下逆のサイフォンつまり U 字形のガラスまたは鉄の管で構成され、その一方の脚は蒸気配管でボイラに繋がり、他方の脚は大気に開放されている。2 本の脚を繋ぐベンド部を満たすようにある量の水銀がその管の中へ注がれていて、一方の脚の水銀の表面は蒸気の圧力にさらされ、他方の脚の水銀表面には外部の空気圧が作用するようにされるので、その二つの水銀面の高さの差は、大気の圧力に比べて蒸気の弾性がいくら高いまたは低いかということを示すことは明白である。

その管がガラスであるとき、水銀面の高さの差は観測することができ、インチの物差しで測定することができるであろう。しかし、鉄の管が使われるときは、大気に開放した方の脚の水銀面に小さい軽い木の棒を浮かべて、管の開放端の上方に固定した半インチ刻みの物差しに水銀柱の高さを指し示すことができる (図 10)。この場合、インチの数値を書いた分割線は半インチ刻みでなければならない。なぜなら、水銀は一方の脚の中で上がった高さだけ他方の脚の中で下がり、そのために、二つの水銀面の実際の高さの差を示すには、その目盛は 2 倍されなければならないからである。

(p.372) その管は、銃身と同じ方法で錬鉄で作られるが、二つの端で平行になるように、U 字形に曲げられる。その管の内面は、両方の脚が正確に同じ直径になるように、精密に中ぐりされなければならない。そうされなければ、一方の脚の中で上がった長さと同じだけ他方の脚の中で下らないので、その圧力計は圧力を正しく示さないであろう。

この種類の蒸気圧力計は、通常 2 本のネジで蒸気管 a またはボイラ C の端、時には、シリンダ E の蒸気ケースに取り付けられる。または、蒸気圧力計は、火とダンパーの調整のために機関士が常にガイドとすべきものであるから、ボイラに繋がっていて機関士が見るのに便利な場所であれば、どんな部分に取り付けてもよい。

ピストン 機関のピストンは、ワット氏の最初の機関に対して既に記述したもの (p.326) と同様である。彼は、ピストンの作り方をかなりの完成度に持ってくるまで、機関に何の進歩ももたすことができず、それが完成して以降、彼の方法は変えられることがなかった。すなわち、ピストンの周囲の溝を獣脂油をよくしみ込ませた麻で編んだ柔らかいロープで満たし、ピストンのカバーを用いて、溝に麻の上からリングが押し当てら

れる。このカバーは幾本かのネジで麻の上に非常に強く押し下げられ、パッキングが緩くなるのに合わせて時々締め付けられ、このようにして麻は強制的にシリンダの内側へ押しつけられる。

ピストンの縁は、真に円形になるように旋盤で加工され、シリンダの内側へびたりとはめ合わされる。ピストンカバーも旋盤で加工され、麻パッキングが詰められる溝の上端と下端となる二つのリムは、シリンダに接触しない程度に密に適合するように作られる。この方法により、パッキングは溝から出ることはできなくなる。

ピストンロッドも真円になるように旋盤で加工され、ピストンの中央を貫通するその下端は、底面を下にした円錐形に作られる。この円錐は、ピストンの中心を通して非常に正確に中ぐりされた対応する穴に通され、ピストンをロッドに非常に強固にかつ正確に結合する。ロッドの上端はソケットにはめ込まれ、ソケットとロッドを通して開けられた穴にクロス・キーを差し込んで固定される。このソケットは適当な継手でアーチヘッドの鎖に繋がれる。

研磨されたピストンロッドは、シリンダカバーの中央に形成されたソケット、つまりパッキンボックスを貫通している。そのソケットの下部はピストンロッドに非常に正確にはめ合わされた穴であるが、その上部は広くなり、ロッドの周りに麻のパッキングを押し込むためのスペースを残している。麻パッキングをロッドのまわりに強制的に押し下げるために、麻の上にロッドに合うリングつまりカラーが取り付けられ、2本のねじボルトで強制的に麻を押し下げる。

シリンダのカバーは円形の板であり、シリンダの上端周囲のフランジに付けられ、多数の強力なねじボルトとナットで固定される。そのカバーは正確にその位置に付けられるように、シリンダの中へ少し落ちて入り、カバーの周囲の継手は、白鉛を塗った編んだ麻ロープのパッキングにより蒸気に対して気密に保たれる。このパッキングは継手の間に入れられ、ボルトで圧縮される。

ピストンを挿入されるときは常に、シリンダカバーを持ち上げなければならず、ボルトを取り外した後カバーを持ち上げるために、ウィンドラスとテークルが天井に固定されている。

弁の構造 弁は端が円錐形に作られた円形の真ちゅうの板であり、ノーゼルの鑄鉄のボックスまたは蒸気配管の中に固定された対応する真ちゅうのリング、つまり弁座に正確に適合するように作られる。弁で閉じられる開口部の直径はシリンダ直径の $\frac{1}{5}$ とすべきであり、通路の面積はピストンの面積の $\frac{1}{25}$ とすべきであろう。従って、直径 48 インチのシリンダ用の弁は、最も小さいもので開口部直径 9.6 インチとすべきである。

(p.373) 図 11 のスケッチは、上部蒸気弁を表す。図中の円は内側から見た蒸気管の開口部であり、ボイラからの蒸気をボックス b b に導入する。c はシリンダ上部への分岐管または流路であり、d は鉛直の配管の一部である。E は弁座であり、リング状の真ちゅうである。弁ボックス b b は配管 d の最上部にフランジで連結され、その二つのフランジの接合部に弁座を受けるために作られた凹部またはセルの中に、弁座がセメント付けされる。弁座の開口部の内面は、正確な円錐形の穴に形作られている。

弁自体は円形の真ちゅう板 D であり、弁座の円錐形開口部に適合するように、周囲を円錐形に加工され、二つの円錐は金剛砂を用いて、互いに非常に密着するように研磨される。この円錐形の接合部は鈍角に作られているので、気密であるにもかかわらず、弁はその弁座に固着しない。弁はスピンドルつまり丸い軸を持っていて、そのスピンドルは、リング状の弁座 E を横切るクロスピースの穴の中を上下に自由に動くことができる。弁の上側には強力な金属片 C が強固に接合されていて、C の片側は歯形ラックの形に成形され、その歯は、弁ボックスの側面で両端を支えられた鉄の軸 4 に固定された金属のセクター歯車に作用する。鉄の軸 4 の一端は弁ボックスの側面を貫通しており、研磨されてその穴にうまく適合して気密を保ってあらゆる漏れを防ぐ。この軸の端はボックスの外へ突き出てその先にレバー 4 3 が付いていて、そのレバーは、ロッド 3 2 によりハンドル r の軸 t に固定された別の短いレバー 2 t に繋がれている。ハンドル r はプラグ l の突き出し

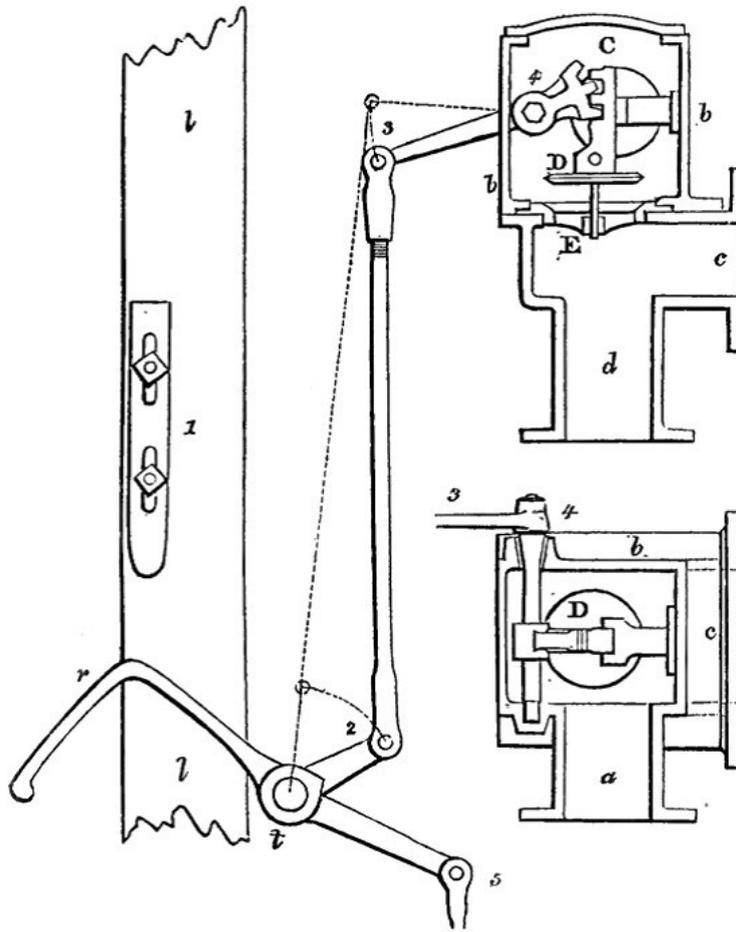


図 11 上部蒸気弁とその制御ギア

たチョック 1 により動かされる。

弁を閉じて気密を保ち、かつ、蒸気を迅速に通過させるために小さい力で開くようにすることが、極めて重要である。これが、以前の回転式の調整器に代わって円形のリフト式弁が採用された一つの理由であった。蒸気の圧力が円形の弁の上に作用して弁を非常にきつく閉じて維持するが、それを弁座つまり開口部から出して引き上げるには、重りによるかなりの力を要する。最初の頃はその重りを非常に重くすることが必要とされ、手動で機関を管理する際に大きい不便を引き起こしていたが、ワット氏は弁を上げるための非常に簡単で効果的なレバー配置法を発明した。

(p.374) 蒸気が弁を下へ保持する力は瞬間的なものであり、弁が弁座から離された瞬間、弁が $\frac{1}{2}$ インチも上がらない間に圧力はほとんど作用しなくなる。したがって、その力は機関にとって障害という程ではないが、機関を起動停止する人にとっては不便な労働であるだろう。

ワット氏の考案によると、弁を開くレバーは弁を上げ始める時にその力が非常に大きくなるような配置に置かれる。図 11 は弁が開いた状態を示していて、プラグ 1 が下降中であり、その一つのピンつまりチョック 1 がハンドル r に正に接触して、それを下げて弁を閉じようとしている、と仮定しよう。同じ軸上のレバー t 2 はロッド 2 3 によりレバー 3 4 に繋がれ、レバー 3 4 は弁ボックス b の中に入れられたセクター歯車の軸 4

に固定されている。したがって、プラグ 1 のチョック 1 がハンドル r を押し下げてレバー t 2 をその軸回りに回したとき、ロッド 2 3 がレバー 3 4 を押し上げて弁が閉じられる。その時、セクター歯車軸のレバー 3 4 がそれを動かすロッド 2 3 に対してほとんどロッド 2 3 に直角である一方で、ロッド 3 2 とレバーの腕 2 t とは一本の直線状となり、その結果、ロッド 2 3 はてこ 3 4 の長さをフルに使う、セクター歯車を固定した軸 4 を回転させるように作用することになる。

この時の状況は図の点線により示されていて、弁は、ハンドル r を前述のキャッチつまりデテントにより下方へ保持され、弁を開く必要が生じるまで閉じられている。そして、プラグがもう一つのピンによりそのキャッチを外し、ハンドル r の軸に固定されたレバー t 5 の端からロッド 5 で吊るされた重りにより、その軸とレバーが図の実線位置へ回転され、それにより、レバー t 2 はロッド 2 3 を引き下ろしてレバー 3 4 を回し、歯車ボックスの中のセクター歯車とラックにより弁 D を持ち上げて蒸気の流路を開く。この配置においては、弁を開く最初の瞬間では、重りとレバー 5 t によりレバー t 2 を介してロッド 2 3 に非常に大きい力が加えられる。しかし、レバーが点線の位置から離れるにつれて、レバー t 2 はロッド 2 3 を引き下ろす有効な長さを持つようになり、その運動が続くにつれて、クランクの作用と同じ原理でその長さは長くなる。そのため、弁の上に大きい圧力が作用する初期では弁を持ち上げるレバーの力は大きく、弁が持ち上げられてその抵抗力が克服された時には、レバーは弁を最大高さまで迅速に持ち上げることができる配置となっている。

蒸気が弁の開口部を通過して通路を遮られないためには、弁が弁座から上げられるべき高さは、開口部直径の $\frac{1}{4}$ 以上必要である。この比率で直径 9.6 インチの弁を開くには、2.4 インチ以上持ち上げられねばならない。直径 9.6 インチの円の面積は 72.4 平方インチであり、その円周 30.15 インチに高さ 2.4 インチを掛けると、同じく 72.4 平方インチとなる。

凝縮装置 蒸気の凝縮に当てられる部品はできる限り冷たくしておかれることが必要であり、また、蒸気の操作または通路に用いられる部品はできる限り熱く保たれるべきである。このために、コンデンサと空気ポンプは、冷水ポンプ R で常に冷水で満たされた水槽 G の中に置かれ、受け取るすべての熱を運び出すために、少量の余分の水を水槽から流出して排水する。そして、噴射弁がこの水槽内の低い位置に置かれるならば、最も冷たい状態の水を用いることになるであろう。

噴射 (p.375) 噴射水の量は、吐出し弁 m 位置での熱水の温度が約華氏 96 度つまり生暖かい温度となって流出するように、調整されなければならない。そのとき機関は良好な状態であるが、ホットウェルは 110 度を超えてはならず、もしそうでなければ真空の状態は良くないであろう。ホットウェルの良好な平均温度は、102 度とすればよいであろう。

凝縮するための水が不足して、水を空気にさらして冷却するための十分な時間をとることなく、繰り返し使用しなければならなくなるのがしばしば生じる。この場合、ホットウェルを適切な温度に保つのに必要なだけの大量の水を、ホットウェルに加えることは好ましくない。なぜなら、このように大量の噴射水を空気ポンプで汲み上げるより、真空が不完全である方がより良いからである。

ワット氏が彼の機関で噴射に必要な水量を計算した方法は、以下の原理に基づいている。

凝縮に際して、1 立方フィートの蒸気は約 1 立方インチの水を作り出すことができ、さらに、1 立方フィートの蒸気は、1 立方インチの沸騰水よりも、960 立方インチの水の温度を 1 度上げる量の熱量を含んでいる、と考えることができる。水の粒子が分離されてそれまでの距離の 12 倍まで引き離されて、液体の水が空気のような状態になるのは、このような大量の熱が 1 立方インチの水の中で潜在的な熱となること、つまり、温度上昇により感知することのできない熱 (潜熱) として含まれることによるのである。

ここで、この蒸気がある機関の真空のコンデンサに入る時、その目的はそれを元の液体の水に凝縮することである。これは水を噴射することにより、冷水が熱い蒸気と接触してそこから熱を引き出して水自身の温度を上げて、蒸気を冷却することによりもたらされる。そのように蒸気から抽出された熱は、その空気状の状態を引き起こした潜熱の一部であり、蒸気の大部分はその状態を続けるのをやめて、水の粒子は互いに元に戻り、再びその液体の形となる。しかし、この過程ですべての蒸気が凝縮されることはない。なぜなら、蒸気は通常の大気圧から減圧されていて、そのため、コンデンサの何もない空間は、希薄な蒸気または非凝縮性気体で満たされたままになり、噴射水により冷却された温度に応じて、または、噴射水が蒸気から熱を取り去った後で蒸気自身が保持している熱量に応じて、多少の密度と弾性を持っているからである。

ワット氏は、以下のことを確認した。彼の機関のコンデンサに含まれる蒸気と水の温度が 100 度になるならば、排気した空間の中に残っている蒸気は、1 平方インチあたり 1 ポンドにも満たない圧力に等しい弾力性しか持たないであろうから、蒸気を更に冷却してより希薄にかつ弱くするのに必要な更に多くの噴射水を投入するより、ピストンの降下に多少の抵抗となるこの弱い蒸気を常にコンデンサおよびシリンダ内に残す方が得策である。

ボイラ内の蒸気の温度が 212 度であると仮定して、その蒸気の潜熱として 960 を加えるならば、その蒸気に含まれる熱の表示として、1172 が得られる。そして、これからホットウエルの温度として 100 度を差し引くならば、1072 が得られ、これが、温度 212 度で大気圧の弾性の気体状の蒸気から、その大部分を凝縮して温度 100 度の液体の水へ変えるために、冷水により蒸気から取り出さなければならない熱の表示である。ただし、温度 100 度で約 1 ポンド/平方インチの弾性の空気状の非常に少量の蒸気の部分を無視している。

(p.376) この熱を吸収するのに必要な冷水の量は、最初に射出されるときその温度に依存し、これが 50 度であったならば、その水が温度を 100 度上げるのに吸収する熱は、 $(100 - 50 =) 50$ と表されるであろう。そして、1072 の中に 50 は多数回 (すなわち 21.44 回) 含まれるので、噴射水の量は、それにより凝縮される蒸気に含まれる水の量の、何倍もの大きさにならねばならない。

ボイラ内の蒸気の熱 (温度 212 度の顕熱 + 潜熱 960)	= 1172
凝縮後に保持する熱 (すなわち、ホットウエルの温度)	= 100
凝縮の間に蒸気から抽出される熱	= 1072
蒸気と混合後の噴射水の熱; すなわち、ホットウエルの温度	100
噴射前にそれが持っていた熱; すなわち、冷水の温度	50
蒸気を凝縮して噴射水が得る熱	= 50

ここで、1 立方フィートの蒸気が 1 立方インチの水を含むとされているので、コンデンサの中に入ってくる 212 度の弾性蒸気 1 立方フィートに対して、50 度の冷水 $(1072 \div 50 =) 21.44$ 立方インチ (または、近似的に $\frac{1}{80}$ 立方フィート) がコンデンサ内へ噴射されなければならない。そして、蒸気と水の混合物は 100 度の熱水 22.44 立方インチとなるであろう。

しかし、ワット氏は、噴射水は 50 度までは冷たくないかも知れず、また、他の状況下では追加の余裕を必要とするかも知れないので、ボイラから蒸発する水 1 立方インチに対する十分な噴射水量は、1 ワイン・パイント (wine pint)(= 28.9 立方インチ) であると見込んで、と述べている。

これは、冷水単位量 (measure; 体積の意味) に対して蒸気 60 量の比に極めて近い値であり*42、ニューコ

*42 (訳注) $\frac{\text{蒸気体積}}{\text{冷水体積}} = \frac{1 \text{ ft}^3}{28.9 \text{ in}^3} = \frac{12^3 \text{ in}^3}{28.9 \text{ in}^3} = 59.79$

メン機関で必要とされる量 (スミートン氏の実績によると約 $10 \frac{1}{2}$ 倍であった。第 2 章 p.180 および 第 3 章 p.239 を参照) を大きく超えており、より完全な凝縮を示していることから、新しい機関の優位性を示している。なぜなら、ニューコメン機関は、最も良い条件で動作したとして、1 平方インチあたり 7 ポンド以上の荷重を支えられないのに対して、ワット機関は、8 フィート長の行程を毎分 12 行程、つまり毎分 96 フィートのピストンの運動を行うとき、11 ポンドを大きく下回らない荷重を支えるであろうからである。

「ここで言ってきたことは、単なる好奇心の問題でなく、それは、機関の良好な動作状態を判定する正確な規則を提供しているということである。なぜなら、我々は、ボイラの水位を上下させることなく、一時間あたりボイラへ入る水量を、正確に評価することができるからであり、また、噴射水量についても同様である。もし、最後の値 (冷水単位量に対する蒸気量の比) がここで与えられた比率 (温度 50 度および 100 度とした比率) より大きいのであれば、蒸気が漏洩またはいくらかの不適當な場所での凝縮により、浪費されていることは確信できる。」

ホットウェルの温度を、できるだけ低く低下させることは非常に重要である。なぜなら、シリンダは、ホットウェルと同じか、またはそれよりむしろ高い温度の蒸気で満たされ、ピストンのその反対側の圧力に対抗して機関のパワーを減少させる若干の弾性を持つからである。このことは、ワット氏が真空の状態を改良するために彼の機関に適用した真空計により示されている。この真空計と共に蒸気圧力計の水銀柱の高さを用いることにより、機関が発揮できる実際のパワーを示すことができる。

(p.377)

ワット氏の機関で必要とされる噴射水量を求めること。膨張動作がなく、冷水は 50 度、ホットウェルは 100 度の温度であると仮定する。

規則：インチで表したシリンダの直径の 2 乗にフィート/秒で表したピストンの運動を掛けて、積を 10000 で割る。商は立方フィート/分で表した所要冷水量である。

例：直径 48 インチの 2 乗 = 2304、これに $\times 96$ フィート/分 = 221184、 $\div 10000 = 22$ 立方フィート/分。

計算式 (訳注)：

蒸気 60 ft^3 に対して冷水 1 ft^3 が必要であるとすると、

$$\begin{aligned} (\text{所要冷水量 } [\text{ft}^3/\text{min}]) &= \frac{\pi \left(\frac{\text{シリンダ直径 } [\text{in}]}{12 \text{ in/ft}} \right)^2 \times (\text{ピストン速度 } [\text{ft}/\text{min}])}{60} \\ &= \frac{(\text{シリンダ直径 } [\text{in}])^2 \times (\text{ピストン速度 } [\text{ft}/\text{min}])}{11000} \\ &> \frac{(\text{シリンダ直径 } [\text{in}])^2 \times (\text{ピストン速度 } [\text{ft}/\text{min}])}{10000} \end{aligned}$$

著者は、分母の 11000 を安全側に丸めて 10000 としている。

注意：この結果を、膨張原理で動作する機関の場合に適用するには、(冷水量は蒸気量に比例することより、) 上記の冷却水量を膨張倍数で割ればよい (p.367 を参照)。

例：上記の機関 (訳注：直径 48 インチ、行程長 8 フィート、毎分行程数 12、ピストン速度 96 フィート/分) のピストンが濃い蒸気で 5 フィート動かされる場合、以前に示したように膨張数は 1.518 となるので、毎分の噴射量は $22 \div 1.518 = 14.5$ 立方フィートである。

冷水ポンプの容量

冷水ポンプの容量は、噴射に絶対的に必要とされるものより、より多くの水を提供するよう計算されなければならない。なぜなら、凝縮水槽の水温を低く保つために、排水管を通じて冷水の一部はその水槽から常に流出されなければならないからである。冷水ポンプ容量の通常の比率は、膨張動作しない機関では、シリンダの蒸気容積の $\frac{1}{48}$ である。この比率のもとで、ポンプバケットがピストン行程長の $\frac{1}{2}$ の行程を行うのであれば、ポンプの面積はシリンダ面積の $\frac{1}{24}$ でなければならない。したがって、ポンプの適切な直径は、シリンダの直径を (24 の平方根 =) 4.9 で割ることにより求まるであろう。

例：シリンダ直径 48 インチ ÷ 4.9 = 冷水ポンプ直径 9.8 インチ。ピストンの行程長が 8 フィートのとき、冷水ポンプの行程長は 4 フィートとなる。

真空計 真空計はコンデンサ内の排気の程度を示すための計器であり、そのガラス管の上端が小さい銅管でコンデンサに繋がっていることを除いて、晴雨計つまり気圧計と同じ様に作られている。ガラス管の下端は開放されて、小さい水槽つまり水盤に入れられた水銀中へ入れられ、水銀の水面は大気圧にさらされている。ガラス管は長さ約 32 インチで、鉛直方向に置かれて、コンデンサからの銅管がガラス管の上端に非常に気密となるように接続されている。機関が動作中でコンデンサ内で真空が形成される時、真空計の管は排気されて管内の水銀面は圧力から解放されるので、水盤内の水銀面に作用する大気の重さにより、そのガラス管内の水銀柱はコンデンサ内の真空の完成度の大小に応じた高さまで上昇する。それは、普通のトリチェリの気圧計つまり晴雨計で示されるのと同じである。

コンデンサから真空計管の頂部に繋がる管には、コックを取り付けて、それをわずかにだけ開かなければならない。もしそうしなければ、機関の行程ごとの真空度の変化によりその管内の水銀高さが常に脈動し、正確な観察が妨げられるであろう。水銀が管内を上昇する高さを測るために、一般の晴雨計の目盛りと同じように、水盤の水銀面からの高さをインチの数字で目盛った定規が管の背後に固定される。

機関が正常に動作して、漏れがなく、また冷たい噴射水で動作しているとき、真空計のコックを極めてゆっくりと開いていくと、水銀は水盤の水銀面のレベルから管の中を 28 インチ高さまで上昇するであろう。通常の大気圧の下では気圧計の水銀柱は 30 インチを示すので、これは、コンデンサ内で凝縮せずに残される薄い蒸気の弾性が、水銀柱 2 インチの圧力に等しいことを示す。大気中の空気は入っていないと仮定すると、弾性表によるとその蒸気の温度は華氏 102 度近くとなる。しかし、何らかの空気が常に薄い蒸気に混入してその弾性を増加しており、ホットウェルの中へ排出される水の温度は約 100 度となるであろう。

(p.378) 機関の毎行程ごとに、水銀はゆっくり上昇して急速に降下することが観測される。ピストンがその行程の頂上まで上がる戻り行程の終了時点に近づくにつれて、真空はもっとも完全となる。なぜなら、その時に噴射により最も冷たい状態が作り出され、また、空気ポンプもちょうどその行程を完了し、コンデンサから空気、水および蒸気の一部を排気するからである。この間で、水銀柱はしばしば 28 ないし 28 ½ インチに達するであろうが、排気弁が開かれて蒸気がコンデンサへ流入する時、水銀柱は 27 ないし 26 ½ インチまで急速に降下するであろう。しかし、ピストンが作業行程を完了するまではシリンダは排気されていて、コンデンサへは蒸気が入って来ないので、水銀柱は動かないであろう。噴射水は噴射されて蒸気を凝縮し続けるので、水銀柱はゆっくり再上昇し始めるかもしれない。噴射が締め切られた後、機関が戻り行程を行っている間、コンデンサは空気ポンプバケットの上昇により更に排気される結果、水銀柱はより迅速に上昇し続けるであろう。そして、ピストンがシリンダの頂部に達する時までに、水銀柱は元の高さ 28 ないし 28 ½ インチに回復するであろう。

観測が終われば真空計管のコックは閉じられなければならない。また、常時閉じておかれなければならない。機関のブローを行う時は、水銀が水盤から飛び散るのを避けるために、コックを閉じなければならない。機関が動作していない時には空気が漏れて入り水銀が水盤の中へ下りるのであるから、水銀を入れる水盤は全ての水銀を受け入れられるように十分大きくなければならない。

ガラス管は壊れ易いので、真空計管は以前に説明した蒸気圧力計のように、鉄で逆サイフオンの形 (p.372) に作る方が良くであろう。一方の脚はコンデンサに繋いで他方の脚は大気に開放し、一方の脚の中の水銀柱の上昇が他方で水銀柱の対応する降下をもたらすようにして、一方の脚に対してだけ目盛りを付す。双方の脚

の直径が同じである限り、その目盛りは半インチ幅とすればよい。しかし、もし双方の直径が異なれば、目盛りは半インチ幅でなく、2本の脚内の水銀面管の真の高さの差を示す適切な比率になるように、試行により目盛られねばならない。

この真空計用のための逆サイフォン管は鉄で作ってもよいが、管の両方部分は正確に同一直径でなければならず、そうでない場合は結果は誤りとなる。鉄の管では脚の中の水銀の高さの差を見ることができないので、実験により目盛りをつけることは難しい。この真空計管は、細い銅管とコックでコンデンサに繋がねばならない。その表示指針は、蒸気圧力計と同じく管の開放端に入れられた軽い木の棒である。水銀を管の中へ、開放端から数インチ以内の高さまで注ぎ込み、その水銀の表面に棒を浮かべてその上端で物差しの目盛りを指示する。その物差しの数字は、単管式のものとは逆向きにしなければならない。

機関の真空計は真空の完成度つまり排気された空間へ入る空気の圧力を示し、蒸気圧力計は空気中へ逃げる蒸気の圧力を示す。そして、これら二つの水銀柱の高さを加え合わせたものは、蒸気がボイラからシリンダへ通過する時、またはシリンダからコンデンサへ通過する時に、全く抵抗が伴わないと仮定して、蒸気がピストンに及ぼすことができる最大の力を示している。

空気ポンプ (p.379) コンデンサで良好な真空を維持するためには、この空気ポンプは大きい寸法でなければならず、コンデンサも通常、ポンプと同じサイズとされる。したがって、コンデンサに含まれる弾性蒸気は、毎行程その半分の量が空気ポンプに引き出されるので、その1回の動作により2倍に希薄化される。もし、ポンプのバケットが引き上げられる時にその下に残される真空の空間が、コンデンサの容積に等しければ、コンデンサ内の蒸気は2倍の空間を満たすように膨張しなければならない。その半分はコンデンサの中に残る一方で、他の半分はポンプの中へ入り、次の行程で引き出されるであろう。これは、コンデンサから空気ポンプへ蒸気が通過する際に、フット弁 k が何の障害にもならないとの仮定に基づいている。

ワット氏の単動機関における空気ポンプの普通の比率は、ポンプバケット直径をピストン直径の半分に製作し、ピストン行程の半分の長さだけ動かすことである。これらの比率では、空気ポンプの面積はシリンダ断面積の $\frac{1}{4}$ となり、その容積は $\frac{1}{8}$ となるであろう。この大きさのポンプを満たす量の空気が、コンデンサから毎行程引き出されると考えてならない。なぜなら、前記 (p.360) のように、ポンプを満たす薄い蒸気は、大気の弾性になるまでに、非常に小さい体積にまで収縮しなければならないからである。

空気ポンプバケットに大気の圧力がかかるのを、吐出し弁 m が遮っているのを、機関の運動に対して、バケットには (そのパッキンの摩擦を除いて) ほとんど抵抗が働かず、最後に、バケットが行程の上端近くへ達した時に、その上にある水が実際に弁 m を開いてホットウェルの中へ出て行く。バケットが上昇していた間の抵抗は、ポンプの胸を当初満たしていた希薄な蒸気を圧縮して体積を小さくするだけであり、それにより、蒸気は大気と同じ弾性を持つようになり、吐出し弁 m を通じて出て行くことができる。この圧縮に対する抵抗はゼロから始まり、最初は非常にゆっくりと増加するが、バケットが上昇するにつれて増加の速度はより速くなり、そのため、その運動に対する抵抗は急速に増加して、それがコースの頂部に近くなるときにはかなりの大きさになる。しかし、行程の最初から終わりまでの種々の抵抗の合計をとると、大ピストンのパワーと比較して小さいものでしかないことが分かるであろう。

バケットが高く引き上げられて弁 m から水が排出され始めて以降、それが打ち勝たねばならない抵抗は、バケット1平方インチあたり13ないし14ポンドである。なぜなら、バケットはその上面で大気的全圧力を支えねばならず、その下面はコンデンサからフット弁 k を通じて入ってくる希薄な蒸気で押されるだけだからである。この抵抗は機関の運動と逆の戻りの行程のちょうど終端となり、可動部分のエネルギーを無効とする傾向を持ち、キャッチピンをたたくことなく可動部を静止させるのに役立つ。

コンデンサに噴射された水を抽出するのに要するパワーは、ワット氏の見積もりによると、シリンダ内で動作する蒸気のパワーの約 $\frac{1}{60}$ の値となる。空気ポンプのバケットを動かすのに必要なパワーは、その値より少し大きくなる。ここで、もし摩擦を除いた機関の有効なパワーがピストンの 1 平方インチあたり $8\frac{2}{3}$ ポンドであり、コンデンサ内の蒸気の弾性が大気より 1 平方インチあたり $13\frac{3}{4}$ ポンド小さいとすると、空気ポンプを動かすパワーは $\frac{1}{38}$ を超えないであろう。そして、摩擦や他の状況を考慮に入れると、機関が膨張なしで濃い蒸気で動作するとき、空気ポンプによる抵抗は機関のパワーの $\frac{1}{30}$ を越ず、そして、多少なりとも膨張的に動作する機関では $\frac{1}{30}$ から $\frac{1}{36}$ となるであろう。

(p.380) 空気ポンプで引き起こされる摩擦は、ピストンの摩擦の $\frac{1}{4}$ ないし $\frac{1}{5}$ と推定されるであろう。なぜなら、バケットの円周および摩擦面の広さは、ピストンの $\frac{1}{2}$ 近くであるが、それは半分の距離しか動かないからである。

空気ポンプ胴の頂部のカバーとパッキンボックスは、シリンダと同じ方法であるが、より小さい寸法で作られる。バケットはその周囲に溝があり、麻のガスケットで満たされるが、その溝にはピストンの場合のような可動リングまたはカバーはない。したがって、その溝回りにパッキンを巻くには、バケットは胴から引き出されなければならない。パッキンを巻いた後、胴の中へ再度挿入されなければならない。

空気ポンプバケットの弁は蝶形弁のようにヒンジ継手で開くフラップ扉であるが、皮革を使わずに真ちゅうで作られている。バケットの上面も、その上に弁がよく合うように真ちゅうで覆われている。フット弁 k と吐き出し弁 m もまた真ちゅうで作られ、それらの上端でヒンジ継手で吊るされている。これらすべての弁で、運動の大きい自由度と気密の正確さが重要である。なぜなら、これらはコンデンサ内の希薄な蒸気と空気により開かれねばならず、そして、蒸気の通過を妨げるような抵抗があれば、バケットが上端に上がった時の空気ポンプ内に比べて、コンデンサ内の排気状態はより不完全なものとなるであろうからである。同じ理由により、これらの弁の開口部は十分な大きさであることが必要である。その通常の比率は、空気ポンプの面積の $\frac{1}{4}$ である。直径 24 インチ (面積 = 452 平方インチ) の空気ポンプを持ち、シリンダ直径 48 インチの機関について見ると、この比率によると、フット弁と吐き出し弁の開口部は $6\frac{1}{2}$ インチ \times $17\frac{1}{2}$ インチ = $113\frac{3}{4}$ 平方インチとなり、バケットの二つの弁の開口部もほぼ同じ面積となる。

シリンダの蒸気ケース 凝縮装置を冷たい状態で維持するために水中へ浸けるのと同様に、シリンダも蒸気に浸けられるべきである。この目的のため、ワット氏は最初からシリンダの周囲に蒸気を入れたケーシングを用い、更にその頂部と底部にも同様のケーシングを用いた。これは蒸気の内表面積を大きくして、そのためにシリンダ自身の表面で生じる以上に外側のケーシングをより急速な凝縮にさらすにもかかわらず、これは非常に有益な効果をもたらすと考えられた。良好な真空を得るためには、ピストンの上方であれ下方であれ、シリンダの内面を凝縮が起こらないような温度に保つことが必要であると考えられる。なぜなら、大気圧機関のようにシリンダの内部が湿ってくると、真空下では低温で蒸発が起こるので、シリンダ内表面のこのような湿分または水分が蒸発し、それにより生じる希薄な蒸気により、真空が損なわれるであろうからである^{*43}。

(p.381) ボイラからの蒸気で満たされた蒸気ケースは、シリンダを常にその中の蒸気と同じように熱い状態に保つので、凝縮や湿分はシリンダ内面で形成されなくなる。また、ケーシングの外表面から周囲の空気中へ熱が失われて、それに応じて、ケーシングの内面で蒸気が凝縮して水になるが、この熱の損失は、機関の運転には障害とはならない。

蒸気ケースは通常、空気へ熱を伝えにくい木のケーシングで囲まれる。もし、このケーシングをそこからの

^{*43} この状況の重要性は、非常に小さいに違いない。なぜなら、冷却され続けて排気されているコンデンサが、シリンダ内で形成されるような蒸気を常に引き出して、その原因による真空の悪化を防ぐであろうからである。

熱の伝達を完全に遮る物質で覆うことができれば、それはシリンダ自体に対してもより便利に適用できるであろうから、そのような物質は全く蒸気ケースの使用に取って代わるであろう。しかし、熱の伝達を少しも許さない何らかの物質は知られていない。最良の案は、シリンダをかなりの厚みの干し草の束で包み、そして、木の桶板のケーシングを当てて樽のように箍(たが)と一緒に締めることである。この木の桶板を更に外面を磨いた薄い銅シートのケーシングで覆うならば、周囲の空気中への熱の損失は極めて小さくなるであろう。シリンダがこのように十分に覆われたならば、蒸気のケーシングがあるかどうかは、ごくわずかな違いしか生じないであろう。蒸気ケースが用いられるときも、空気中への不必要な熱の損失を防ぐために、常にこのように覆われるべきであり、もし蒸気ケースが覆われていなかったら、空気中への熱の損失はかなりの量になる。シリンダまたはその蒸気ケースは、しばしばレンガ造りで囲んで建造され、外側にしっくい塗られる。これは、非常に良い方法である。

蒸気ケースには、主蒸気管から分かれた小さい銅の分岐管で、流路を閉じるストップコックを介して蒸気が供給される。また、ケースの底に、蒸気ケース内の蒸気が凝縮して溜まった熱水を排出するためのもう一つのコックがある。または、このコックの代わりに小さい銅管が蒸気ケースの下部に繋がれ、凝縮水槽の横を通って下がり、その端が再度上向きに曲げられて、シリンダの底とほぼ同じ高さでその先端が開放される。凝縮した水は、この逆サイフォン管を通じて常に自由に流出するが、開放端の高さの下方の管の曲がった部分で常に十分な水柱が保持されるので、蒸気はそれに続いて出ることはできない。

大きい機関ではシリンダの底の下に別の仮の底があり、両者の間には、外側の蒸気ケースから小さい銅管で供給される蒸気を受け入れる隙間が設けてある。シリンダカバーも中空とされて蒸気ケースを形成し、そのため、シリンダは全周にわたって蒸気で完全に囲まれている。

蒸気ケースは、ボルトで繋がれたセグメントに分けられてシリンダ周囲に配置される。それは、シリンダ自身より多少なりとも頻繁に加熱冷却にさらされるので、その上の部分で、麻と獣脂を詰めたソケット継手を用いてシリンダに取り付けられ、固く密着されているが、シリンダが蒸気ケース以上に熱によって膨張するときはいつでも、高さ方向に少し滑ることができる。

シリンダの正面の鉛直の蒸気管は、平衡弁を収めた四角のボックス e に繋がれているが、その管とシリンダの間の不均等な膨張の影響を取り除くために、類似の継手が用いられている。

継手 ワット氏は彼の最初の機関で、ニューコメン機関のシリンダ底に使われていたのと同じ方法で継手を作った。すなわち、シリンダとその底のフランジ同士の間をガラス用パテで覆った鉛のリングを挟み、ねじボルトでその鉛を非常に強く圧縮した。シリンダへの少量の空気の流入は、大気圧機関の性能に実質的に影響を及ぼさなかったため、この方法は、大気圧機関に十分であることが分かっていた。しかし、ワット氏の機関では継手の数が非常に多く、空気の漏れは非常に大きい弊害を及ぼすので、彼はより良い継手を入手することが必要であるとわかった。数年の間彼が採用した案は、フランジの表面を非常に正確に作り、乾性の亜麻仁油に浸してパテを塗った厚紙のパッキンを間に挟むというものであった。これを非常に固くねじで締めると良い継手となった。厚紙はフランジに合うように切り取られて、温水に浸して完全に柔らかくされ、そして一方のフランジの上に当てられて、完全に乾くまで大きい重りでそこへ押しつけられた。厚紙はこのように挿入個所に適合されて成形され、乾性の亜麻仁油を入れた平らなパンの中に浸され、気泡を発生のをやめるまでその中に浸し続けられた。その油は水浴の中に入れて、沸騰水の温度まで加熱された。このように準備された厚紙は、非常に細かい乾性白亜で作られて同じ乾性油と合体されたパテを両側に薄く塗られ、フランジの間に挟まれて、ねじで非常にきつく締めつけられた。白鉛は、白亜ほど良くはないことが分かった。このように作られた継手は、最初は非常に気密であったが、十分な耐久性がないことが分かり、その後、鉄セメント(iron

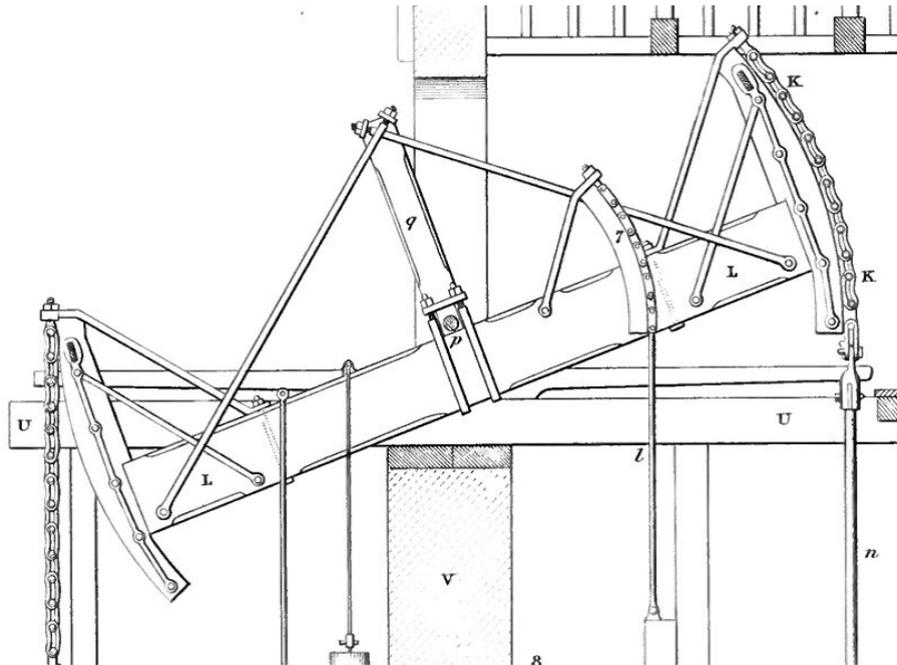


図 12 ワット氏の鉱山用機関の大レバー (Plate X より)

cement) と呼ばれるより良いセメントが見出された。これは、現在一般的に使用されている。

大レバー (p.382) 十分な大きさの木が手に入る時は常に、オークの単一はり good 好まれ、それを荷重に耐えられるようにするために、家屋の屋根の枠組みと同じ原理に基づいたトラス構造とされた。銅版画 Plate X (図 12) を見られたい。レバーの軸つまりその運動中心の上のレバー頂部に、はりの長手方向と直角に強力な材木ポストが取り付けられ、このポストの上端からレバーの両先端まで強力な鉄の筋交いが延ばされて、レバーに非常に強固にボルトで固定されている。レバーはこのようにトラス構造つまり筋交いで補強され、はりが底辺、直立のポストが高さ、鉄の筋交いが斜辺となる三角形を形成している。筋交いがはりに良好に繋がれているならば、筋交いが延びるか直立のポストが縮むかしない限り、はりは曲がることのできないことは明白である。

Plate X で示すように、ワット氏は通例大レバーの軸 p をはりの上側に取り付け、それを鉄の紐でそこに強固に固定した。このようにして、フィッツジェラルド氏により以前されたように (243 ページを参照)、レバーの重心は運動中心の下方へ持って来られた。ワット氏は、膨張動作システムを採用する以前のもっとも初期の機関で、この方式を採用し始めたが、膨張式機関ではりが運動中心の上方へ置かれて、重心を運動中心の上へ上げていたならば、蒸気が膨張する間の蒸気の効果の減少を均等化する傾向を持っていたであろう。これは、1782 年の彼の仕様書で推薦された第 5 の方法であった (p.349 を参照)。

高出力機関のレバーを単一の部材で作るには、十分なサイズの木を入手することが困難であったため、多くの場合 4 本または 6 本のはりを 1 本に結合することが必要であった。それらのはり是对にして横に並べ、その対を 2 段または 3 段に平らに上下に重ねて、それらが上下間で滑るのを防ぐために合い釘 (dowells or joggles) を用いて一緒にねじで締め付けた。そして、このように作られたはりが、前述のように鉄の筋交いでトラス構造にされた。ある場合には、運動中心から伸びた 2 本のはりまたは柱の上端に、横転した文字 𠃉 の

ように筋交いが取り付けられた。

(p.383) 上記の機関は数年間、鉱山の排水のための標準的な機関であり続けた。そして、現代までさえ、ワット氏が Plate X で示した状態へ持ってきて以降、その動作方法または部品の比率の実質的な変更や改良は行われていない。

これらの多数の機関がボルトンとワットの両氏によりソーホーで製造され、この王国の採掘活動が行なわれている各地に設置されたが、コーンウォール地方は彼らの最大の地域であった。1778 年から 1790 年の間で、彼らはその地域の大気圧機関を特許機関で置き換えてしまい、そして、それは採掘活動を大いに容易にし、その特許権者に大きい報酬を生み出した。なぜなら、彼らは、機関製造者としての彼らの利益に加えて、毎年払われた節約分の $\frac{1}{3}$ を受け取ったからであった。機関の大型化、その台数の増加および石炭価格の高騰は、これらの利益を非常に大きくした*44。その新しい機関により鉱夫らに与えられたパワーを行使することにより、彼らは地中のより深く鉱脈を追求することが可能となり、それにより多くの新しい価値ある発見がなされた。そして、さらに広い深い鉱山を排水するために、彼らはより大きい機関をソーホーから入手しようとした。

これらの機関の寸法は、シリンダ径 48 から 66 インチであった。それらの性能について、ワット氏は次のように述べている。

「コーンウォールの鉱山での実績から計算すると、これらの機関で多少なりとも膨張方式で動作させたとき、良質のニューカースル炭またはスウォンジー炭を 1 ブッシュェル燃焼することにより、24,000,000 ~ 32,000,000 ポンドの水を 1 フィート高さへ上げることができることが見出された。ただし、その効果は大なり小なり、機関の状態やその大きさおよび動作速度に依存し、また、石炭の品質にも依存する*45。」

ボルトンとワットの両氏は、ダービーシャーやカンバーランドおよびスコットランドで、鉛鉱山のためにこれらの機関を 2、3 台製造した。しかし、非常に少ない例を除いて、炭鉱ではニューコメン機関で排水され続けた。

彼らはまた、ロンドンの大部分の給水設備のために大気圧機関に代えてこの種の機関を製造した。2 台の大きい機関と 1 台の小さい機関が、パリの公共給水設備用として輸出された。他に、フランスおよびシレジアの鉱山用としても輸出された。

ワット氏の単動機関のもう一つの広範な応用は製鉄所向けであり、時には水車に水を供給する戻り機関として用いられた。他の例では、直接動作による炉の送風用として用いられ、それは、ワット氏が 1777 年頃最初に実用化した複動式の送風シリンダ (p.328 を参照) を用いるものであった。

ボルトンとワットの両氏により 40 年ないし 45 年前に作られた機関の多くは、コーンウォールを除いて、まだ実用的に運転されている。コーンウォールでは、それらは後年、ウルフ氏の機関に置き換えられるか、または、ウルフ氏のシステムに従って高圧蒸気で膨張的に動作するように改造された。この地方では、燃料が高価であったことと採掘活動が大規模であったために、真の改良の開発と実用に対して、他のどの地域よりも高い報奨金が付けられてきた。

*44 「当初、これが彼らの契約の方法であったが、その後、論争とトラブルを避けるために、彼らは、近隣の石炭の価格と品質に応じて、それぞれの大きさの機関ごとに一定のある料金に固定した。」ロビンソン博士ロビンソン博士の記事 "Steam-Engine", 1814 でのワット氏の注釈を参照。

*45 これらの性能の詳細は述べられていないが、32,000,000 ポンドを上げるためには大幅に膨張作用を取り入れることが必要であり、おそらく蒸気は大気圧よりかなり高かったに違いない。

5 ホーンブロアー氏の 2 段膨張蒸気機関、1781

(p.384) ジョナサン・ホーンブロアー氏は、コーンウォールヘワット氏が機関を導入する以前にその地区で広範囲に活動していた技術者であり、ワット氏の機関が大気圧機関に代わって採用され始めたとき、彼はコーンウォールの鉱山で使用中の大きい大気圧機関の多くを建造していた^{*46}。

ジェームズ・カーター・ホーンブロアー氏は、"Gregory's Mechanics", vol. ii. p.385 の第一版の中で、ホーンブロアー氏は 1776 年に彼の二重シリンダ機関のテーマに取りかかり、シリンダ径 14 インチ、11 インチの大きい実用模型を製造するまで続けた、と述べている。下記のこの機関の図面と説明は "Encyclopaedia Britannica" の編集者のもとへ送られ、その出版の第三版の中のロピソン博士の記事 "Steam-Engine" の中で出版された。そこでは、それはブリストル近郊で建造されたと述べられている。

以前 (p.346) に述べたように、この機関のための一つの特許が 1781 年にジョナサン・ホーンブロアーにより取られた。そして、1790 年頃、コーンウォールのティンクロフト (Tincroft) 鉱山で、この案に基づく機関がホーンブロアーとウィンウッド (Winwood) の両氏によって建造された。もう一つの機関がバース (Bath) 近郊の鉱山でも建造された (図 13)。

(p.385) A および B は二つのシリンダを表し、A が大きい方とする。各シリンダ内をピストンが動き、そのロッド C および D はそれぞれのシリンダカバーのパッキンボックスを貫通している。小さい方のシリンダには四角形の管 G によりボイラから蒸気が供給され、G にはボイラからの蒸気管に繋ぐためのフランジが付いている。この四角形の部品は両方のシリンダに分岐するように見えるが、実際は大きいシリンダには小さいシリンダの排気が供給されるようになっている。c および d は二つのコックであり、通常のようにハンドルとタンブラーが付けられてプラグはりで動かされる。図の手前側のシリンダ側面には別の連絡管があり、その断面は正方形または長方形であり、また二つのコック a b が付いている。コック b の直下の管 Y は、コック b を開くことにより小さいシリンダ B の上部と下部の間の連絡が確立される。シリンダ A の向こう側のコック c の直下に同様の管があり、そのコック c を開くことにより、大きいシリンダの上部と下部が互いに連絡される。

コック d および a が開かれ、コック b および c が閉じられたとき、ボイラからの蒸気は、d を通って小さいシリンダ B の上の部分の中へ自由に入り、そのシリンダの下の部分から出る蒸気は、Y a を通って大きいシリンダの上の部分へ自由に入る。しかし、各シリンダの上の部分とその下の部分との連絡はない。この状態は、機関はその作業行程を開始する準備ができている状態である^{*47}。

大きいシリンダ A の底から排気管 K が繋がりと、そのシリンダへの開口部に弁 e が付いている。排気管はその後下方へ曲がり、円錐形のコンデンサ L に繋がれている。コンデンサは中空の箱 M の上に固定されていて、その箱の上には、空気と水を抽出するためのポンプ N および O が立てられ、抽出された水は最後に樋 T に沿って流れて水槽 U へ入り、既に熱くなっているため、そこからボイラへ給水するためにポンプ V により汲み上げられる。コンデンサのすぐ下の S の位置に、コンデンサ L 内へ冷水を流入させるためのスピゴット弁 (spigot-valve) があり、そして、この上側に小さい噴射管が繋がって排気管 K のベンド部まで達している。凝縮装置全体は冷水の水槽 P に入れられている。1 本の小さい管 P がコンデンサの側面からきて、樋 T

^{*46} (訳注) ジョナサン・ホーンブロアー (1717-1780) は、ニューコメンの直弟子であったジョゼフ・ホーンブロアー (1696-1762) の息子であり、父の後を受けてコーンウォールで機関建造普及に当たっていた。ジェームズ・カーター・ホーンブロアー (1744-1814) はジョナサンの息子の一人であり、弟のジョナサン・ジュニア (1753-1815) と共に特許裁判でワットと争った。

^{*47} (訳注) 参考までに、ホーンブロアー氏の機関の模式図とコック開閉状態を描くと、下図のようになるであろう (次ページへ)。

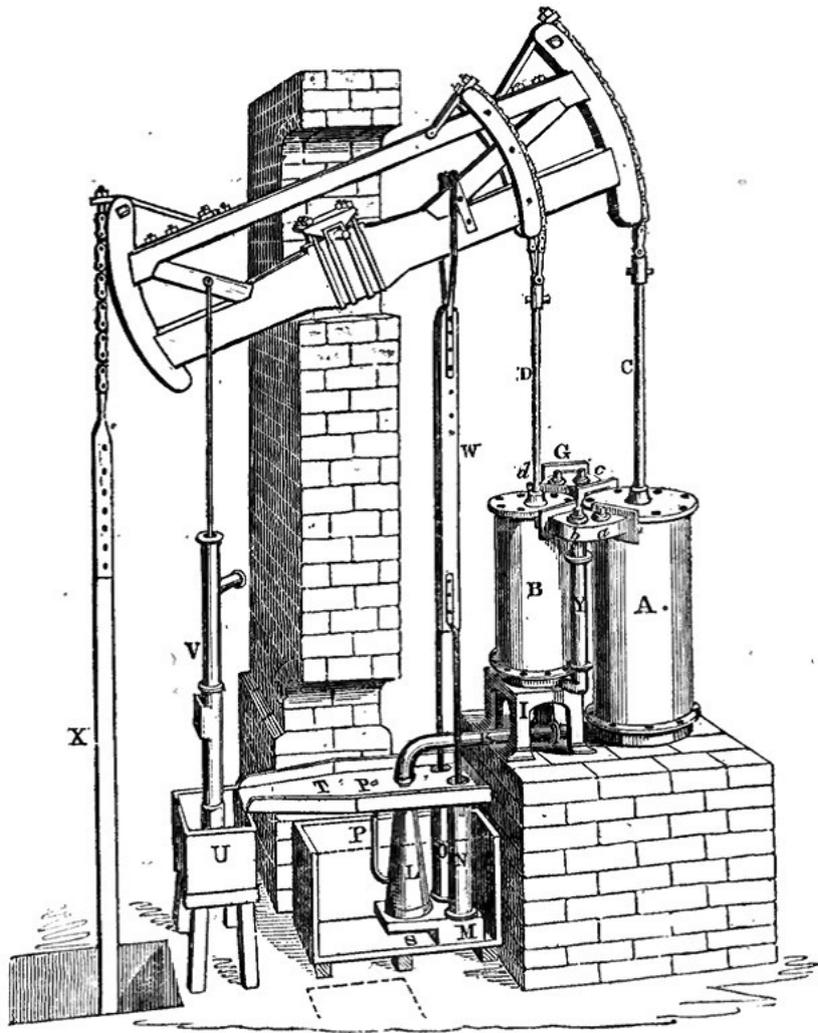
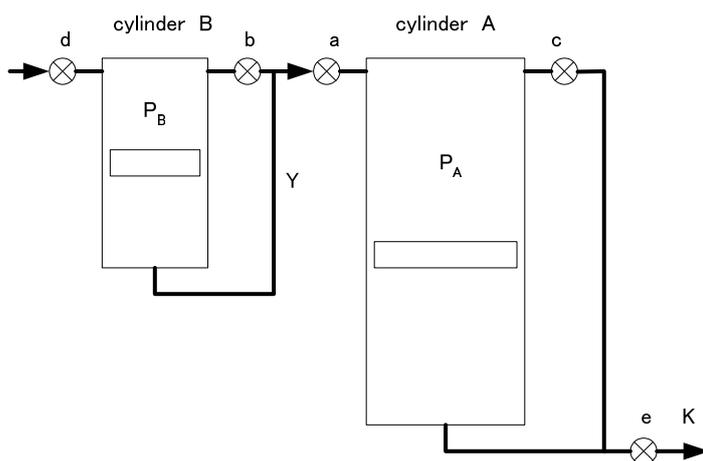


図 13 ホーンブロアー氏の 2 段膨張機関



コック動作 (: 開 x: 閉)

行程	d	b	a	c	e
下降行程		x		x	
戻り行程	x		x		x

の底に繋がり、そこで弁 p で蓋をされている。その弁は、その上を常に流れる水で覆われて気密に保たれている。

二つのシリンダのピストンロッド C および D は、大レバーの一端に取り付けられたアーチヘッドからの鎖に吊るされ、大レバーの他端のアーチヘッドから、主スピアつまりポンプロッド X が吊るされている。したがって、二つのシリンダのピストンは、ポンプ・スピアが引き上げられる時に降下するが、小さいシリンダ B の行程長は大きいシリンダ A のものより短い。ポンプ・スピア X の重さのために、大レバー外側端の重量が優っており、そのため、機関の静止位置では図に示されたとおり、両方のピストンはそれぞれのシリンダの上端に位置することになる。

すべてのコックが同時に開かれてボイラから蒸気が大量に入って来て、コンデンサ L の中で凝縮はまったく生じないと仮定する。そのとき、蒸気はすべての空気を押し出すに違いなく、最後には弁 p から押し出して、すべての部品は熱い蒸気で満たされるであろう。

ここで、コック b および c を閉じ、コンデンサの噴射弁 S を開く。コンデンサ内で直ぐ凝縮が開始し、そして、大シリンダ A の下部から蒸気が排出されるであろう。そして大シリンダのピストンの下側には圧力がまったく無くなり、同時に、小シリンダ B の下部と大シリンダ A の上部の間の連絡管 Y および a が開かれ、蒸気はシリンダ B の下部から A の上部へ移動するであろう。そして、そのピストンの下側は真空である一方で、その上側の圧力によりそのピストンは押し下げられ、それにより機関が動作するであろう。

(p.386) その運動の開始時では、小シリンダ B のピストンの下は、その前の行程から残っていた蒸気で満たされていて、その蒸気はボイラ内と同じ程度に濃厚で弾性的である。従って、そのピストンはつり合い状態にあり、ボイラから d を通って小シリンダの上部へ入った新鮮な蒸気により、そのピストンの上は押されるにもかかわらず、それは下降する傾向を持つことができない。しかし、その運動が始まって進行するにつれて、B の下部からの蒸気が Y a を通って、A のピストンが降下して残された空間へ出て行く。シリンダ A は B より大きく、また、大きいピストンが吊るされた大レバーのアーチは、B の小さいピストンを吊るしているアーチよりも運動中心からより遠い位置にあるので、その結果、両シリンダのピストンがそれぞれのシリンダ内で降下するとき、二つのピストンの間の蒸気は、両ピストンがシリンダの最上位置にあったときより、より広い空間を占めなければならない。したがって、蒸気は体積を増してその弾性は減少しなければならず、ボイラからやってきて B のピストンの上を押し出す蒸気の圧力に、もはやつり合わなくなる。その結果、そのピストンは大レバーを引き下げ始め、大きいピストンが機関を動かすのを助ける。

ピストンが下降し続けるにつれて、小さいピストンの下でかつ大きいピストンの上の蒸気は、それが占める空間が大きくなるので、密度と弾性を減少させ続けなければならない。それゆえ、小さいピストンの下の蒸気は、同じピストンの上側に働く蒸気の圧力とつり合うことが次第にできなくなり、そのピストンはこれらの圧力の差でレバーを押し下げないように働き、その作用はその行程の始まりから終わりに向かって絶えず増加するであろう。一方、大きいピストンの上の圧力は、それが二つのピストンの間に含まれる蒸気の弾性に由来するので、その行程の始めから終わりまで連続して減少する。したがって、小さいピストンの有効な力は連続的に増大し、大きいピストンの力は連続的に減少し、鉱山の主スピアを上げるための組み合わせた効果は、それが単独でどちらかのピストンで動かされた場合より、より均一な作用に近づくであろう。

ここで、各ピストンがそれぞれのシリンダの底に達したと仮定し、コック d および a を閉じて A の底の排気弁 e も閉じ、そしてコック b および c を開くと考えよう。それにより各シリンダの上部と下部の連絡が確立され、それらのピストンはその上と下の面で等しい力で押されて平衡の状態になり、そして、つり合い重りによりピストンはそれぞれのシリンダの頂部へ引き上げられる。

ピストンがそれらのコースの頂部に到達し、シリンダ B は通常の濃度の蒸気で満たされ、シリンダ A は、

それと等しい絶対量であるが、より大きい空間を満たすように膨張した蒸気で満たされていると仮定しよう。コック b および c を閉じ、コック d および a、更に A の底の排気弁 e も開くとする。再び、コンデンサにより大きいシリンダが排気され、そのピストンを下降させるであろう。このようにして、蒸気が供給される限り操作が反復され、ボイラからシリンダ B へ供給された一回分の通常の蒸気が、それぞれのシリンダの作業行程の間に消費される。

この機関のコックは、互いに非常に正確に研磨された、それぞれ 2 枚の平らな円板で構成される。2 枚の円板の一方は、両円板の中心に通されたピンを中心にして回転する。各円板には扇形の開口部が三つ開けられていて、それら開口部は互いに正確に一致し、その表面の $\frac{1}{2}$ より少し小さい面積を占める。開口部が一致するようにその可動円板を回すことにより、蒸気のための大きい通路が開かれ、また、一方の円板の非開口部が他方の開口部を覆うように可動円板を回すことにより、そのコックは閉じられる。そのような調整器は、アパートの暖房用の温風ストーブでごく普通に用いられている。

(p.387) ピストンロッドのパッキンボックスを気密にするためのホーンブローア氏の装置は、互いに少し間隔を開けて置かれる 2 層のパッキンによるものであり、蒸気管から分岐した小さい管で 2 層のパッキンカラーの間へ蒸気を吹き込むものである。この蒸気は大気の圧力より少し強いので、空気が上部カラーを通過して入って来るのを効果的に防ぐことができる。下側のカラーを通過して蒸気が少しシリンダ A の中へ入るが、それは何の害も及ぼさない。

このパッキンボックスを形成する方法は、以下のとおりである。シリンダの頂部に、ピストンロッドを囲んで柔らかく編んだ燃系（よりいと）を入れるためのノーゼルまたはボックスがある。燃系は下へ詰め込まれて、その深さの約 $\frac{1}{3}$ を占める。その上に、上部と下部が平らな 2 個の真ちゅうリングを組み合わせた一種の床几（しょうぎ；tripod）を置く。これらのリングは、ピストンロッドとボックス内面との間の空間と同じ幅であり、その二つのリングは 3 本の小さい支柱で一定距離に隔てられている。そのリングの複合物はピストンロッドの上端からはめられ、その上に別の所定量の燃系が載せられ、前記のように下へ詰め込まれる。これらの二つのパッキンを保持するリングの間に残された中空の空間には、ボイラから蒸気が供給される。ピストンの上側の蒸気の弾性が大気圧の空気の弾性より小さい時に、このようなピストンロッドまわりのパッキンは、空気がシリンダに入るのを防ぐであろう。

ホーンブローア氏の機関の性能 2 個のシリンダでの膨張作用を適用することにより、ホーンブローア氏が、ワット氏の 1 個のシリンダで行ったより大きい何らかの効果も、実際に得ることができたようには見えない。

1791 年に、ホーンブローアとウィンウッド (Winwood) の両氏は、コーンウォールのティンクロフト (Tin Croft) 鉱山で 1 台の機関を建造した^{*48}。その機関の大シリンダは直径 27 インチで、そのピストンは行程長 8 フィートで動作し、小シリンダは直径 21 インチで、行程長 6 フィートで動作した。ポンプの水柱は 5541 ポンドの重さであったと言われていて、機関は 5 フィート 10 インチの行程を毎分 7 行程余り、つまり毎

^{*48} この機関の性能について著者が得ることのできた唯一の記述は、ポルトンとワット両氏の代理人のトマス・ウィルソン (Thomas Wilson) により 1793 年に出版されたパンフレットからのものであり、そのパンフレットは、公然と彼の雇い主の側に立って、ワット氏の機関に対してホーンブローア氏の機関が劣ることを証明するためのものであった。ポルトン・ワット両氏の代理人とホーンブローア氏および彼の友人との間で、この主題についての新聞論争の中で、いくらか感情的な論争が引き起こされたように見受けられ、上記のパンフレットの記述の中で、その機関の性能が過大に評価されていたという可能性はない。

上記のパンフレットの著者は、ホーンブローア氏とある金額のお金を賭けるために、同じ鉱山にポルトン・ワット機関を建造すると提案した。その機関はシリンダ直径 27 インチ、行程長 8 フィートであり、重さ 16623 ポンドの水柱で行程長 6 フィートのポンプを動かすのに十分なパワーを持つとされた。毎分の行程数は指定されていなかったが、同じ燃料で、それはティンクロフト機関の計算値より 50 % 余分の水を上げるとしている。ティンクロフト機関の計算値では、石炭 1 ブッシェルで 14,222,120 ポンドの水を 1 フィート高さへ上げたようである。したがってこの陳述は、そのポルトン・ワット機関は 21,333,000 ポンドの水を上げるということになる。

分 41 フィートの運動を行った。これは 7 馬力近くのパワーとなる。1 カ月の動作の間、1 日当たり平均 22 ブッシェルの石炭が平均消費量として述べられていた。それは毎時 0.92 ブッシェルであり、それは 1 ブッシェルにつき 458 ストロークの割合となり、 $\times 5.83$ フィート行程 = 2670 フィートの運動、 $\times 5541$ ポンド = 14,800,000 ポンド・フィート/ブッシェル より、1 ブッシェルの石炭消費により 14,800,000 ポンドの水を 1 フィート高さへ上げる。

(p.388) この種の機関について、"Gregory's Mechanics" での J. C. ホーンブロー氏(注)の報告の中で、1 台の機関がバースの近郊で、非常に不利な状況の下で、この原理に基づいて建造されたと述べられている。その機関は、直径 19 インチと 24 インチで、それぞれ行程長 6 フィートと 8 フィートの二つのシリンダを持っていた。したがって、大きいピストンの面積は小さいピストンの 1.6 倍の大きさであり、大きいシリンダの容積は小さいシリンダの容積の 2.13 倍であった。

ワット氏の特許侵害を恐れて凝縮装置は非常に劣悪なものであり、得られた最大の排気(真空)は水銀柱 27 インチであった。その機関は深さ 576 フィートの 4 段リフトのポンプを動かし、ロッドとバケットの大きな慣性と摩擦を伴って、4500 ポンドで 6 フィート行程を毎分 14 行程行った。バケットのいくつかは、せいぜい直径 $3\frac{1}{2}$ インチ以下であった。それは、1 時間当たり 70 ポンドの石炭(軽い石炭)を消費した。

ここで、荷重 4500 ポンド \times 行程 6 フィート = 27000 ポンド、これが機関が毎行程 1 フィート高さへ上げる重さであり、 $\times 14$ 行程/分 = 378000 ポンド が毎分 1 フィート高さへ上げられる。これは、近似的に 11 $\frac{1}{2}$ 馬力に相当する。そして、1 ブッシェル = 84 ポンドの石炭により、27,200,000 ポンドを 1 フィート高さへ上げる比率になる。その記述に依拠するならば、それはその大きさの機関としては非常に良い性能であり、ワット氏の機関から期待できる性能よりも良好である。

後者の "Gregory's Mechanics" 掲載の機関の大レバーは、重量を大きくすることなく剛性を得るために、図 13 で示すようにフレーム構造に作られた。主はり(注)は運動中心軸の下に 4 本の帯とナットで吊り下げられて、その軸に強固に結びつけられる。このはりの両先端に、アーチヘッドがほぞとほぞ穴で繋がれる。そのアーチの上端は主はりに平行な"つなぎはり(tie-beam)"により繋がれ、そのつなぎはりの端は鉄帯とボルトでアーチに固く結ばれる。最後に、2 本の強い支柱つまり斜めの筋交いが、主はりの中程から上のつなぎはりの端まで渡され、そのつなぎはりの端に作られた肩部に埋め込まれる。

"Nicholson's Journal", Vol. II. p.68, 八つ切り版の中で、J. C. ホーンブロー氏は、長年大きい荷重の下で使われ続けたこの大レバー主はりの報告をしている。レバーの長さは 21 フィートで、レバーのアームは 3 ~ 4 フィートであった。すなわち、ポンプロッド用と小さいピストン用のアーチの半径は 9 フィートであり、大きいシリンダのピストン用のアーチの半径は 12 フィートである。全体をまとめた高さは 30 インチで、木の小角材は 12 インチ \times 6 インチである。そこで彼が示した図の中で、下側のはりつまり主はりは上側のつなぎはりと同じサイズで表されているが、これはおそらくミスである。水柱の重さは 4 段のリフトで 4800 ポンドであり、440 ファゾムのポンプロッドで 4 段リフトと述べられていて、それにレバーの反対側端の付属物を加えて、抵抗に打ち勝つのに要するパワーは約 7 トンになる。

ホーンブロー氏は、この機関では、二つの状況のもとでこの原理の適用の利点(注)が示されると言っている。一つは、場合によっては機関運転員は小さいピストンをレバーから外し、大きいピストンだけで運転することができる。その時、ボイラは機関を動かし続けるのに十分な蒸気を発生させるだけでよい。しかし、小さいシリンダのピストンロッドをレバーに付ければすぐに、機関はその元の活力を取り戻すことができ、蒸気は安全弁を吹き上げるであろう。

また、排気弁を閉じて保持するデテント(キャッチつまり戻り止め)がたまたま動作ミスを起こしたとき、ピストンはチェックされて、戻り行程で完全に上まで上がることができず、デテントがその役目を果たすように

なるまで、繰り返し下がることになるであろう。それはその行程の終端での機関のパワーについての実際上の問題である。

(p.389) これらの記述は、ホーンブローア氏改良の真の価値を決定するには、あまりに不確実であり、たとえ我々がこれら 2 台の機関の性能の正しい評価をしたとしても、それはほとんど何の証明にもならない。なぜなら、ホーンブローア氏は、ワットの特許継続の間中、彼は先へ進むのを阻止されていて、前述した 2 台以外に機関を作ることができず、彼の機関を完成する機会を持たなかったからである。

1792 年に、ジョナサン・ホーンブローア氏は、1781 年の彼の特許期間を延長する法令を求めて議会へ申請した。しかし、ポルトンとワットの両氏は、それはワット氏の発明の剽窃であり何の改良でもないと主張して、ホーンブローア氏の特許延長に反対した^{*49}。その延長申請は拒否された。

(p.390) "Edinburgh Review", Vol. XIII, p.327 において、以下のように記述されている。「1799 年には、

^{*49} 以下の文書が、議会のメンバーに対して提示された。

特許期間延長の法令を求めるジョナサン・ホーンブローア氏の特許申請に反対する、ポルトンとワット両氏側の短い声明

ウスター侯爵により発明され、キャプテン・セイヴァリにより不完全な状態で使い始められ、ニューコメン氏によりほとんど全体的により良く変更された蒸気機関は、今なお大量の石炭を消費するとわかり、もしワット氏がパートナーのポルトン氏と共に今日よく知られている改良を行わなかったとしたら、石炭が高価なコーンウォールの多くの主要な鉱山は捨てられなければならない。パートナーのポルトン氏と連携したワット氏の尽力により、王国を通じて (特にコーンウォールで) 非常に広範囲に使用されるようになったのである。

1769 年にワット氏は彼の発明に関する特許を取得して、1775 年に議会の法令が通過されて、それによりその発明に対するそれ以降 25 年間の彼の利益が彼に保証された。

以下の記述では、ワット氏の改善直前の機関の状態と彼の発明とを対比して示す (スミートン氏はニューコメン機関の建造で非常に重要な改良を行い、それをおそらく可能であった限りの最大の完成度へ持って来たが、一方、凝縮方式およびその他の原理は変更されずに残された)。

第 1: 蒸気は異なる容器で凝縮されるのであり、(ニューコメン機関のように) そこで蒸気のパワーを取り出すシリンダそのものではない。

第 2: 蒸気シリンダは、それを蒸気でまたは熱をゆっくり逃がす物体で取り囲むことにより、その中へ入る蒸気と同じだけ暖かく維持されるのであり、(ニューコメン機関のように) 蒸気と冷水を切り替えてシリンダに流入させることにより、交替に加熱・冷却されるものではない。

第 3: 蒸気が混入していたか、または継手または他の個所の何らかの欠陥を通してシリンダへ侵入した空気は、空気ポンプにより抽出されるのであり、(ニューコメン機関のように) 漏らし弁で蒸気により噴き出されるのではない。

第 4: ピストンは蒸気の膨張力によって下へ押されるのであり、(ニューコメン機関のように) 大気の重さによるのではない。

第 5: ピストンを空気に対し気密に保つのに、オイル、ワックスまたは他の同様の物質を用いるのであり、ニューコメン機関のように水を用いるのではない。

1781 年にジョナサン・ホーンブローア氏は、彼の発明であると言われる火の機関に関する特許を取得した。その機関に価値と新奇さがあったならば、ポルトンとワット両氏はその事実を認めたであろう。彼らは、ホーンブローア氏が彼の機関を公正なトライアルに持って来ることに依存はなく、したがって、これまで彼を遮らなかった。しかし 11 年のトライアルの後の (1792 年) 現在、ホーンブローア氏は機関を 2 台だけ建造し、それらはすべての重要な点でワット氏と同じ原理に基づいており、そして、彼の訴訟行為に対して議会の認可を得ようと試みている。ポルトンとワットの両氏は、もはや無口な見物人を続けたり、または、強制が実行に移されて彼らの正当な権利に非常に不当となるのを許すことは、もはや不可能となっている。したがって彼らは、要求にかなう証拠により、ホーンブローア氏の機関はワット氏の発明の直接で明白な剽窃であることを証明しようと取り掛かった。この視点で、ポルトンとワット両氏は以下を証明するよう提起している。

第 1: ホーンブローア氏は、彼の仕様書の中で、そのために何の力を使うつもりであるかを述べていないにもかかわらず、彼のシリンダのピストンを押し下げるために蒸気の膨張力を利用していること。

第 2: 金属の表面に接して蒸気を通し、かつその反対側面に水を当てることによる蒸気の凝縮について、それは、"コンデンサに水または他の冷たい物体を添付することによる凝縮" と仕様書の中で表現されたワット氏の方法を用いる多くの可能な方法の一つではないということ。

第 3: ホーンブローア氏は機関から水、空気および凝縮水を排出するために、彼の仕様書で示した手段を使わずに、実際はワット氏により指摘されて採用された方法そのもの、すなわち、機関により駆動されるポンプを採用していること。

第 4: ホーンブローア氏は、彼のピストンを気密にするために、ワット氏の仕様書で表現されそしてポルトンとワット両氏により使われたものと同じ方法で、油、ワックスまたは他の類似の物質を使用していること。

これらの点が証明されるとき、議会もまたいかなる個人も、ホーンブローア氏の主張が何らかの賛助または支持を受ける権利があると考えたことはないであろうと、ポルトンとワット両者は信じている。

ホーンブローア氏の機関は、ワット氏の特許の侵害であるとして訴訟の対象となった。この構造の機関を使用していた鉱山家たちは、訴訟の対象事案となる危険を冒すより、むしろ、ボルトンとワット両氏の発明の使用に対して、彼らに要求される燃料節約部分を支払った。」また、1800年にワット氏の特許が失効して以降も、その種の機関は1台たりとも建造されることはなかったということも、付け加えることができる。

ロビンソン教授は、ホーンブローア氏の機関の動作原理の数学的な調査を行い、それはワット氏の膨張機関と実質的に同じであることを示した。しかし、このことは正しいが、その効果が達成されるステップには相違があり、そして、その相違は実際には利点となる。なぜなら、二つのピストンを用いることによる複合的な効果のために、一つのシリンダだけで動作するワット氏のシステムで、同じ倍数で蒸気の膨張作用が行われる場合よりも、より均一な動作に近づくからである。

ホーンブローア氏の機関の大シリンダで蒸気自身が膨張することの効果は、以下のように説明できるであろう。ただし、空気または他の弾性流体と同じく蒸気の弾性はその密度に比例し、したがって、その占める体積に反比例すると仮定する。

大シリンダは小シリンダの2倍の容積であったように見える。ティンクロフト機関では、直径21インチで行程長6フィートの小シリンダは14.4立方フィートであり、直径27インチで行程長8フィートの大シリンダは31.7立方フィート、つまり2.2倍となる。もう一方の機関では、直径19インチで行程長6フィートの小シリンダは11.8立方フィートであり、直径24インチで行程長8フィートの大シリンダは25.1立方フィート、つまり $2\frac{1}{8}$ 倍である。したがって、大シリンダが小さいものの容積の2倍であると仮定することができ、また、二つのシリンダでの行程長の違いから生じる複雑さを避けるために、両方のピストンが8フィートの行程を行うと仮定し、大シリンダは直径27インチ = 572平方インチ、小シリンダは直径19.1インチ = 286平方インチとする。

ボイラから濃厚な蒸気が入ってきてピストンに作用するとき、ピストンの有効な力は1平方インチあたり約 $8\frac{3}{4}$ であると仮定してよいであろう。同じ時、その下の蒸気はコンデンサに繋がれて排気されているため、この値は、可動部分の摩擦による減少のない有効な力であるとする。この比率では、大きいピストンの最大の力は $572 \times 8.75 = 5000$ ポンド、小さいピストンでは $\frac{1}{4}$ の大きさ、つまり1250ポンドとなるであろう。以下の計算は単なる一例示のためのものであるので、ピストンが通過しないシリンダ上下の隙間空間に対して、何らかの考慮をする必要はない。

下降行程でピストンに作用する力を、表4に示す。下降行程を16の区間に分けて蒸気の圧力を求め、大ピストン、小ピストンに及ぼされる力、および両ピストンを合わせた力を示している。

(p.392) この表は、十分に自明である。(訳注：下降開始時点で、小ピストン上下には共に8.75ポンド/平方インチの蒸気が入り、大ピストンの下は完全に排気されているとする。) 二つのピストンの間の空間に含まれる蒸気が大きいピストンの上面を押し、またその下面には対抗する圧力がないので、その結果、二つのピストンは合わせて5000lbの力を受けて降下し始めるであろう。その時、小さいピストンはその上にも下にも同じ密度の蒸気が入っており、つり合いの状態である。両ピストンが降下すると、一方の断面が他方の2倍のシリンダ内で両ピストンが等しく降下するので、二つのピストンの間の空間は増加し、したがって、そこに含まれる蒸気は膨張して、増加しつつある空間を満たさねばならない。そして、その蒸気がより希薄になるにつれて、大きいピストンの上の蒸気の圧力は比例して減少しなければならないが、この減少により小さいピストンに降下させようとする力を引き起こす^{*50}。

^{*50} (訳注) 小ピストンの上の圧力は 8.75 lb/in^2 、大ピストンの下の圧力は0であり、共に一定である。両ピストン間の圧力は当初の 8.75 lb/in^2 から、下記のように変化する。

小ピストンの断面積を $A_0 (= 286 \text{ in}^2)$ 、行程長を L_0 とし、行程長に対する各ピストンの変位量を比を x とする($x = 0 \sim 1$)。

この計算結果より、行程全体にわたって平均して、小さいピストンは 758 ポンドの力を及ぼし、大きいピストンはその 4.6 倍、つまり 3485 ポンドの力を及ぼすと思われる。これより各行程長 8 フィートの距離にわたって作用する両ピストンを合わせた力は 4243 ポンドに等しいであろう。ポンプが 6 フィート行程で動作したならば、その水柱の重さは 5660 ポンドであり、それはティンクロフト機関のものより少し大きい。毎行程でボイラから消費される濃い蒸気の量は、小さいシリンダの容積 = 15.85 立方フィートであり、その行程の終わりでコンデンサに引き出される直前では、この蒸気は膨張して 2 倍の空間つまり 31.7 立方フィートを満たしているであろう。

ワット氏のシステムをホーンブローア氏のものと比較するには、小さいシリンダを除去して、直径 27 インチで行程長 8 フィートの大きいシリンダが、ワット氏の膨張法により用いられると考えねばならない。その際、ピストンがその行程の $\frac{1}{2}$ を完了、つまり 4 フィート降下したとき、ボイラから蒸気の供給が遮断されると考える。その時、シリンダはボイラから 15.85 立方フィートの濃い蒸気を受け取っており、その蒸気が 2 倍の空間、つまり 31.7 立方フィート満たすように膨張することにより、残りの 4 フィートの運動が行われる。ピストンによりなされる力を、行程を 16 区間に分けて、表 5 の中に示す^{*51}。

その結果はホーンブローア氏の機関の結果と近似的に同じであり、両方とも正しい原理の上に計算されているれば、正確に同じであったであろう。この計算方法は、徐々に減少する力の代わりに、行程の有限個の段階で作用する力だけを考え、考えている各段階でその力が急に減少すると仮定している。ホーンブローア氏の機関の表では、減少する力は 16 の時点で調べられているが、ワット氏のものにおいては、膨張は行程の半分が完了するまで始まらず、減少する力は 16 の時点ではなく 8 の時点だけでしか調べられていないので、それは真の値から更に離れている。真の値は、無限個の時点で力を見積もることにより確かめることができるのであり、これは、以前に説明したように (p.342 を参照)、双曲線対数 (自然対数) の助けを借りることにより行う

小シリンダ内のピストンの下方の体積は $A_0 L_0 (1-x)$ 、大シリンダ内のピストンの上方の体積は $2A_0 L_0 x$ であるので、両ピストン間の体積は、元の体積 $A_0 L_0$ の $(1-x) + 2x = 1+x$ 倍となる。従って、その圧力は元の圧力 8.75 lb/in^2 の $\frac{1}{1+x}$ 倍となる。これより、大ピストンに働く下降力は

$$F_A = 8.75 \text{ lb/in}^2 \times 572 \text{ in}^2 \times \frac{1}{1+x} = 5000 \text{ lb} \times \frac{1}{1+x}$$

小ピストンに働く下降力は

$$F_B = 8.75 \text{ lb/in}^2 \times 286 \text{ in}^2 \times \left(1 - \frac{1}{1+x}\right) = 2500 \text{ lb} \times \frac{x}{1+x}$$

となる。

したがって、両ピストンによる下降行程での仕事量は

$$\begin{aligned} W &= L_0 \int_0^1 (F_A + F_B) dx = 8 \text{ ft} \times 2500 \text{ lb} \times \int_0^1 \left(\frac{2}{1+x} + \frac{x}{1+x} \right) dx \\ &= 20000 \text{ lb ft} \times (1 + \ln 2) = 33862 \text{ lb ft} \end{aligned}$$

^{*51} (訳注) このワット氏の膨張機関のピストンに働く下降力は、次式となる。

$$F = \begin{cases} 5000 \text{ lb} & (0 \leq x \leq 0.5) \\ 5000 \text{ lb} \times \frac{0.5}{x} & (0.5 < x \leq 1.0) \end{cases}$$

したがって、下降行程での仕事量は

$$W = L_0 \int_0^1 F dx = 8 \text{ ft} \times 5000 \text{ lb} \times 0.5 \left(1 + \int_{0.5}^1 \frac{1}{x} dx \right) = 20000 \text{ lb ft} \times (1 + \ln 2) = 33862 \text{ lb ft}$$

となり、前記のホーンブローア機関の結果に正確に一致する。

表 4 ホーンブローア-氏の膨張機関における蒸気の作用

下降行程の区間	大ピストンの下降力 断面積 572 平方インチ	小ピストンの下降力 断面積 286 平方インチ	両ピストンの組み合わせ下降力 断面積 858 平方インチ
	ポンド	ポンド	ポンド
0 (上端)	5000 (a)	0 (f)	5000
$\frac{1}{16}$	4705	147	4852
$\frac{1}{8}$	4444	278	4722
$\frac{3}{16}$	4210	395	4605
$\frac{1}{4}$	4000 (b)	500 (g)	4500
$\frac{5}{16}$	3810	595	4405
$\frac{3}{8}$	3636	682	4318
$\frac{7}{16}$	3480	760	4240
$\frac{1}{2}$	3333 (c)	833 (h)	4166
$\frac{9}{16}$	3200	900	4100
$\frac{5}{8}$	3075	962	4037
$\frac{11}{16}$	2963	1018	3981
$\frac{3}{4}$	2857 (d)	1072 (i)	3929
$\frac{13}{16}$	2760	1120	3880
$\frac{7}{8}$	2666	1167	3833
$\frac{15}{16}$	2583	1208	3791
1 (下端)	2500 (e)	1250 (j)	3750
計	59222	12887	72109
平均	3485	758	4243

(a) 大ピストン上面は圧力 8.75 lb/in²、下面は真空。

(b) 両ピストン間の蒸気は小シリンダの $\frac{3}{4}$ と大シリンダの $\frac{1}{4}$ を占め、元の体積の $1\frac{1}{4}$ 倍となる。
したがって、大ピストン上面の力は 5000 lb の $\frac{4}{5}$ となる。

(c) 蒸気は小シリンダの $\frac{1}{2}$ 、大シリンダの $\frac{1}{2}$ 。元の体積の $\frac{3}{2}$ 倍。大ピストンの力は $5000 \times \frac{2}{3}$ 。

(d) 蒸気は小シリンダの $\frac{1}{4}$ 、大シリンダの $\frac{3}{4}$ 。元の体積の $\frac{7}{4}$ 倍。大ピストンの力は $5000 \times \frac{4}{7}$ 。

(e) 蒸気は大シリンダの全てを占め、元の体積の 2 倍。大ピストン上面の力は $5000 \times \frac{1}{2}$ 。

(f) ピストンは、上方へ 2500 lb で押され、下方へ 2500 lb で押されて、つり合い状態。

(g) 両ピストン間の蒸気の膨張により、

小ピストン下面の圧力は $2500 \times \frac{4}{5} = 2000$ 、上面圧力は 2500。合力は $2500 - 2000 = 500$ 。

(h) 下面の圧力は $2500 \times \frac{2}{3} = 1666$ 、上面圧力は 2500。合力は $2500 - 1666 = 833$ 。

(i) 下面の圧力は $2500 \times \frac{4}{7} = 1428$ 、上面圧力は 2500。合力は $2500 - 1428 = 1072$ 。

(j) 下面の圧力は $2500 \times \frac{1}{2} = 1250$ 、上面圧力は 2500。合力は $2500 - 1250 = 1250$ 。

表 5 ワット氏の膨張機関における蒸気の操作

下降行程の区間	蒸気の膨張倍数	ピストンの下降力 断面積 572 平方インチ	
		ポンド	
0 (上端)	(ピストン上面の圧力 8.75 lb/in ² 下面は真空)	5000	
$\frac{1}{16}$		5000	
$\frac{1}{8}$		5000	
$\frac{3}{16}$		5000	
$\frac{1}{4}$		5000	
$\frac{5}{16}$		5000	
$\frac{3}{8}$		5000	
$\frac{7}{16}$		5000	
$\frac{1}{2}$		(以降、膨張開始)	5000
$\frac{9}{16}$		$\frac{9}{8}$	4444
$\frac{5}{8}$	$\frac{5}{4}$	4000	
$\frac{11}{16}$	$\frac{11}{8}$	3636	
$\frac{3}{4}$	$\frac{3}{2}$ (a)	3333	
$\frac{13}{16}$	$\frac{13}{8}$	3075	
$\frac{7}{8}$	$\frac{7}{4}$	2857	
$\frac{15}{16}$	$\frac{15}{8}$	2666	
1 (下端)	2	2500	
計		71511	
平均		4207	

(a) このとき、蒸気は、膨張が開始する時の体積 $\frac{1}{2}$ に加えて、更に $\frac{1}{4}$ の体積を占め、元の体積の $1\frac{1}{2} = \frac{3}{2}$ 倍を占める。その圧力は $5000 \times \frac{2}{3} = 3333$ となるであろう。

ことができるであろう*52。

(p.393) このように、所定の蒸気量によって及ぼされる力の総量は、それがホーンブローア氏の方法により 2 本のシリンダで行われるか、またはワット氏のプランに応じて単一のシリンダで使用されるかにかかわらず、同じことであるように見える。しかし、後者(ワット氏案)の場合は 5000 から始まって 2500 で終わる一方で、前者(ホーンブローア氏案)では 5000 から始まって 3750 で終わっているので、その動作の作用はより均一である。

*52 膨張は 2 倍の空間へ向かって行われるので、2 の自然対数 0.693 を用いなければならない。そして、濃い蒸気によりピストンが押される力 $5000 \text{ ポンド} \times 0.693 = 3465 \text{ ポンド}$ が、蒸気が 2 倍の体積へ膨張する時に及ぼす減少する力の平均値である。元の均一な 5000 ポンドの力は行程の半分の長さの間に作用するだけであるから、濃い蒸気が及ぼす力を、8 フィート動く間に 2500 ポンド作用するとすることができる。また、3465 ポンドの減少する力も、行程の半分の間に作用するので、膨張により得られる追加の力を表すのに、8 フィート動く間に 1733 ポンド作用するとすることができる。これより、全体の力は、8 フィートの各行程の間、 $(2500 + 1733 =) 4233$ ポンドの力が作用するのに等しくなるであろう。これは、先に計算した(ホーンブローア機関の)結果に近似的に等しい。

蒸気の体積を最初の 2 倍に膨張させるために、二つのシリンダを用いて複雑化することは不必要である。なぜなら、そのことは摩擦の増加および表面で生じる凝縮の増加を引き起こす。また、追加のシリンダの頂部と底部、および一方のシリンダから他のシリンダへ蒸気を運ぶ配管や流路での余分の蒸気の損失を引き起こす。力がより一層均一になるとの長所はこの場合は帳消しにされ、ワット氏の単純な方法が好まれることとなる。

元の濃い蒸気の体積を 5、6 倍の広範囲まで膨張させてその作用を行わせるとき、二つのシリンダを使用することの長所は顕著となる。その場合、元の蒸気の弾性は大気の 3、4 倍程度の大きくしなければならず、このことは、ウルフ氏により導入された現代の改良となっており、その個所で改めて説明することになるであろう^{*53}。

ホーンブローア氏の機関の説明の最後に、以下の点に注意を喚起する。彼は、一方のより小さいシリンダとピストンの中で濃い蒸気の事前の動作を実施させ、他方のシリンダとピストンで膨張しつつある蒸気を受け取って、その膨張の間にそれから力を取り出すように配置して、実際の改良を前へ進めた。しかし、ホーンブローア氏自身は、その改良を適当な方法で応用してそれから何らかの感知できる程の利益を得ることは行わなかった。それは、彼の後に続く者が行った。

^{*53} (訳注) この内容を含む部分は著者の第 II 巻で計画されていたが、出版されなかった。

6 蒸気の性質についてのワット氏の実験と研究

(p.394) この著名な哲学者で独創的な発明者は、彼の改良蒸気機関を考案するに先立って、この主題に関する自身の知識の状態について以下のように述べている^{*54}。

蒸気は冷えた物体に接触することにより凝縮し、その熱を物体に伝える。日常の経験、等々。

蒸発は、蒸発している流体とそれに接触している他の物体を冷却する。

水および他の液体は、華氏 100 度以下等のごく低温では真空内で沸騰する。これは、カレン博士によって実験的に示された。

比熱と呼ばれる熱容量は、水銀および錫では水よりかなり小さくなる。これはアーヴィン博士によって示された。ワット氏自身は、鉄、銅、および幾種類かの木材の熱容量を水に対する相対値で決定した。

ワット氏はまた、同じ重さの水と比べた蒸気の体積について、いくつかの実験も試みた。そして、水の沸点以上の種々の温度での蒸気の弾性についても、弾性は温度に依存するとの法則で近似して試みた。

あるボイラで 1 ポンドの石炭の燃焼により蒸発する水の量。直径 6 インチの木のシリンダと、1 フィート長の行程を行うピストンを持つ小さいニューコメン機関で、毎行程消費される蒸気状態の水の量。また、毎行程でシリンダ内の蒸気を凝縮させて、ピストンに 1 平方インチあたり 7 ポンド近くの力を及ぼすのに必要とされる冷水の量、等々を求めようと試みた。

後者の冷水の量を比較する際に、蒸気の形の非常に少量の水の中に多量の冷水が混合された時に、どのようにして冷水がそれ程多量の熱を受け取るのかということ、彼は理解することができなかった。そして、彼は (p.312 で述べたように) 蒸気の熱の直接の実験を試みた後、友人のブラック博士に意見を聞いた。その時、ブラック博士は自身が発見したいわゆる潜熱について、ワット氏に説明した。

このように知識を蓄積して、ワット氏は蒸気機関を改良する手段を考え始め、間もなく、完全な機関のためには以下のことが必要であると確信した。すなわち、真空内で水は華氏 100 度以下の温度で沸騰するので、シリンダとその内容物が毎行程その温度以下に冷却されない限り、良好な真空は得られない。しかし、同時に、無駄な凝縮を避けるためには、シリンダは常に蒸気自身と同程度に熱く保たれるべきである。

二つの重要な要請の間のこの矛盾を考えて、シリンダとは別の容器で蒸気を凝縮することにより、その矛盾は解決されるであろう、と彼は考え着いた。その容器は、シリンダに影響を及ぼすことなく、その中で完全な凝縮を生じるのに必要なだけ、低い温度に冷却することができる。また、その結果、蒸気の凝縮水と空気とは、ニューコメン機関のように、この分離コンデンサから蒸気で噴き出すことができないので、ポンプまたは他の同等な装置により引き出されなければならない。

(p.395) ピストンが降下する間、大気の空気の接触によりシリンダ内部が冷却されるのを避けるために、ピストンの上部を押さえるのに、大気圧の空気の代わりに蒸気を適用することが望ましいように見えた。そして、最後に、シリンダが外部の空気により冷却されるのを防ぐために、蒸気を入れたケースの中にシリンダを包み込み、さらにそのケースを木材または熱を通しにくい他の物質で囲むのが有利であるようであった。

このように、程なく発明の哲学的原理が準備されたが、それを有効な方法で実現するために、ワット氏は膨大な苦勞を必要とした。これらの原理を実現する機関の形や、さらに、確立した実際の模型となるまでの段階

^{*54} 1814 年出版のワット氏による "Dr. Robison's Memoir on the Steam-Engine" の改訂版の紹介状を見られたい。この回想録にはワット氏による多くの価値ある注釈があり、1821 年に Dr. Brewster により編集されて八つ折判 4 巻として出版されたロビンソン博士の主要著作集の一部を形成している。

的な改良については、既に記述した。原理が発見された最初の実験は、それをもとにして機械技師としての彼に、その発明を完成させることはできたが、哲学者としての心を満たすには十分な精度ではなかった。数年のうちに、ワット氏は以下の方法で彼の実験を繰り返し拡張した。

種々の温度に閉じ込め加熱した時の蒸気の弾性力についての実験 この主題に関するワット氏の最初の1764年の研究は、既に311ページで述べたように、わずか少数の事実だけを確認した上で、それを用いて他のすべてに対する近似を行うというものであった。完全な一連の正確な実験を行うための時間的余裕ができたのは、1773年および1774年になってからであり、その時点では、他のいかなる哲学者もそのような実験をしていなかった。ワット氏は、二つの異なる形の装置を使用した。彼が最初に用いたその一つの装置は、蒸気の弾性が大気圧の空気より大きい時の蒸気の温度を求めるためのものであったが、その後、彼はより小さい弾性に対するもう一つの装置を追加した。

水銀柱高さ30インチの圧力より大きい弾性の蒸気の温度を決定するために、彼は気密なカバーを取り付けた小さいボイラ、つまりダイジェスタを用いた。長さ55インチで両端が開いたガラス管がカバーの穴に挿入され、紙で周囲を包むことにより気密を保たれた。管の下端は、ダイジェスタの中に置かれた小さな水槽の水銀の中に浸された。カバーのもう一つの穴に温度計が差し込まれ、木のカラーにより、その球部がダイジェスター内のカバーから半インチ下方の位置になり、柄部分と目盛りが外側になるように保持された。

その構造は少し異なるが、図14のスケッチは、ワット氏の装置を説明するのに役立つであろう。A Aはカバーも含めたダイジェスタの断面であり、e f g hは水銀柱を受けるガラス管である。ボール部fは水槽(水銀だめ)を形成しているが、ワット氏の装置ではそれはダイジェスタ内に置かれた開放された水槽であった。a aは温度計である。B b c dは安全弁とピストンであるが、ワット氏は言及していない。

このダイジェスタは水でその半分を満たされて、そのカバーがねじでつく締められて、水を加熱するために大きなランプの上に置かれた。水が沸騰したとき、ダイジェスタの上部に含まれた空気は、水から発生した蒸気で押して、できるだけすみやかに排除されたが、若干の空気が最後まで残ると考えられた。ダイジェスタは非常にゆっくり加熱され、そして、蒸気が蓄積されて温度が上昇するにつれ、内部の水槽の水銀表面の圧力によりガラス管内の水銀柱を押し上げた。ワット氏自身が温度計で示される温度を観測している間、ワット氏を補助していたアーヴィン(Irvine)氏がこの水銀柱の高さをインチ単位で観測し、それぞれ観測しているしばらくの間、熱はできる限り移動しないように維持され、一連の観測全体は数時間を占めた。

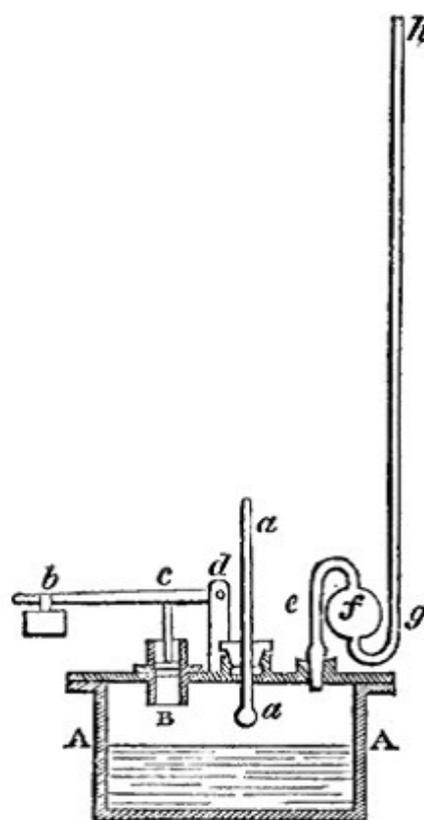


図14 ワット氏の蒸気弾性の実験装置(その1)

表 6 蒸気の弾性についてのワット氏の実験 (その 1)、1774 年

温度 ° F	弾性 インチ Hg	温度 ° F	弾性 インチ Hg
213	30	240	49
215	31	242 $\frac{1}{2}$	50
217	32	244 $\frac{1}{2}$	52
219	33	247	54
220 $\frac{1}{2}$	34	248 $\frac{1}{2}$	56
222	35	250 $\frac{1}{2}$	58
223 $\frac{1}{2}$	36	252 $\frac{1}{2}$	60
225	37	255	62
226 $\frac{1}{2}$	38	257	64
228	39	259	66
229 $\frac{1}{2}$	40	261	68
231	41	262 $\frac{1}{2}$	70
232 $\frac{1}{2}$	42	264 $\frac{1}{2}$	72
234	43	266 $\frac{1}{2}$	74
235	44	268	76
236 $\frac{1}{2}$	45	269 $\frac{1}{2}$	78
237 $\frac{1}{2}$	46	271	80
238 $\frac{1}{2}$	47	272 $\frac{1}{2}$	82

(p.396) その結果は、表 6 に示されている。ただし、その水銀柱の値は、実際に測定した値に 30 インチを加えた値が記述されている。なぜなら、表では蒸気の絶対的な弾性を表示しようと意図しているが、観測される弾性は大気圧の弾性からの超過分だけだからである。ワット氏は、この一連の観測に満足することなく、その後の期間で、その観測をサザン (Southern) 氏に反復させた。そのことは、適当な機会に記述されることになる。

沸点以下の温度のときの蒸気の弾性を測定するために、ワット氏は図 15 に示すようなもう一つの装置を用いた。その主な部分は、気圧計として通常用いられるサイズの長さ約 36 インチのガラス管であり、その上端にガラス管内の残りの容積をすべて含むことができる容積の直径約 1 $\frac{1}{2}$ インチのボールがあり、そのガラス管の下端は開放されていた。このガラス管のボールは、直径 5 インチで深さ 4 インチの円形の錫の容器 (pan) の中へ底を貫通して入れられた。その容器の底の周囲近くに、ガラス管を通すための一個の穴が開けられて、その穴にソケットがはんだ付けされ、ガラス管は、ボールが容器内に残ってその他の部分が容器下方へ出るように、貫通部に紙を巻かれてソケット内へ固く入れられた。

(p.397) 実験を行なう準備として、そのガラス管を容器と共に上下逆にして、そのガラス管のボールを満たすようにその開放端から非常にきれいな水銀を流し込み、管の残りの部分を新たに沸騰した蒸留水で満たした。そしてガラス管の開放端を指で塞いで元の向きに戻してボールと容器を上にして、水銀をガラス管の中へ落として水を球の中へ上げた。ガラス管の下端を水銀の水槽の中へ入れて指を外すと、気圧計の中と同じよう

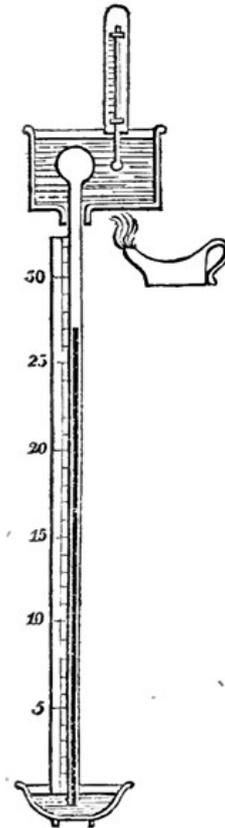


図 15 ワット氏の蒸気弾性の実験装置 (その 2)

に水銀と水がガラス管の中を下がり、水から上る蒸気を除いてボールの中が真空として残された^{*55}。この状態で、目盛りを付けた物差しをガラス管の横に当てて、その物差しの下端を水槽の水銀の表面に浮かべ、水銀

^{*55} これらの実験の精度にとって、ボールに水銀と水を満たす時にそこから空気を完全に排除することが必須である。この目的のために、気圧計を充填する際に、デリューク (De Luc) 氏が彼の論文 "Modifications of the Atmosphere" の中で推奨しているのとまったく同じ注意が払われた。最初にガラス管を満たして液柱を静ませた後、ガラス管を揺り動かして水銀柱を振動させた。そして、しばらくそれを放置した後、水銀の水槽からガラス管の下端を引き出すことなく、ボールを下げるようにガラス管を傾斜させるで示されるように、その水から多くの空気が遊離された。そのとき、水はボール内へに戻ってそれを満たして、小さな泡で空気の存在を示した。この空気を取り除くために、その管の下端を指で塞いで再度それを反転させると、その空気は開放端へ上昇するので、一度沸騰した水をその場所へ補充して充填した。

そのガラス管は元の姿勢に戻され、錫の容器に水が注がれて、水が沸騰するまでランプで加熱された。熱はボールの中の水を蒸気に変え、ガラス管内の水銀をほぼ水槽内の水銀の高さにまで下降させた。その後、容器内の水が冷却されると、水銀が再びガラス管の中を上昇したが、沸騰により多くの空気が水から解放されたために、以前の高さほど高くは上がらなかった。この空気の量は、管を攪拌してしばらく立てて置かれることにより増加した。こうして分離された空気は、前と同様にして管から除去された。そして、同じ一連の操作を繰り返して、27 インチ高さの水銀柱によって膨張しても、ピンの先のサイズほどの斑点の空気も形成されない程に、水は極めて完全にクリアにされた。

これらの操作が正常に行われていた場合には、水銀柱と水柱はボールから出て管の中にまで下降することはなく、ボールのガラスへの水の付着によって吊り下げられて残るが、水銀柱の高さは 34 インチであり、その上に水柱が数インチの高さになり、そして、水槽中の水銀表面の大気圧以外にはその水銀柱と水柱につり合う力はない、ということをやット氏は見出した。水銀柱と水柱とが落ち着くまでには、そのガラス管は激しく振られることが必要とされ、その後、急に降下して、 $28\frac{3}{4}$ インチに落ち着いて、ボールの中に空洞が残った。装置のこの状態は、ガラス管を何度も何度も反転する労力を繰り返した後でなければ、得られなかった。また、長い時間をかけたこれらの操作の後、それは、ボール内を排気しその間に蓄積された空気を排出した状態で、維持されねばならなかった。

面からガラス管内を立ち上がった水銀と水の高さを測った。

次に、ボールを取り囲むように錫の容器に水を満たし、温度を測るために水中へ温度計を入れた。その温度は、最初 55 度であった。ボールとその中の蒸気が周囲の水と同じ温度になるようにいくらか時間を置いて、水銀柱を観測すると、高さ 28.75 インチであり、その上の水柱は高さ 6.5 インチであることがわかり、全体の等価な水銀柱は 29.25 インチであった。その時、普通の大気圧は 29.4 インチであり、したがって、その差の 0.15 インチは、温度 55 度のボール内の蒸気の弾性により支えられている水銀柱であった。

(p.398) 普通の気圧計の水槽の水銀面上の大気圧と、この装置の水銀面上の大気圧とは同じであろう。気圧計では管の上部は完全な真空であるので、水銀柱の重さに何らかの追加をするとつり合いが失われる。しかし、この装置では、水と水銀を合わせた液柱には、それ自身の重さに加えてボールに含まれる蒸気の弾性により、水面に働くわずかな圧力が加わっていた。このため、水と水銀を合わせた液柱高さに等価な水銀柱高さは、一般の気圧計の水銀柱の高さより低くなり、その不足量はボール内の蒸気の絶対的な弾性の測度となるのである。

一連の実験を行うために、錫の容器の下にランプを用いて水を非常にゆっくりと加熱し、熱を均等に拡散するために羽根車で水を絶えず攪拌した。温度計が 10 度の温度上昇を示すごとに、水と水銀を合わせた液柱高さを繰り返し記録した。このようにして温度が沸点の近くになるまで続けられ、大気圧の空気より大きい弾性の蒸気について前述の装置で行われた一連の実験につながれた。これらの一連の実験の結果は、添付の表 7 に示されている。そこで比較された大気の圧力は水銀柱 29.4 インチであった。

蒸気の弾性の全範囲にわたる実験について考えると、温度 55 度での弾性 0.15 インチから、温度 272 $\frac{1}{2}$ 度での 82 インチまで変化することより、弾性は温度よりも更により速い比率で増加し、温度が等差数列的に変化する間、弾性はある種の等比数列的に変化するように見える。これは必ずしも正確にそのとおりではないが、弾性はそのような法則で近似される。

(p.399) この事情は、大きい弾性の蒸気は普通の弾性の蒸気より、より多くの力学的パワーを及ぼすことができるとの、誤った説明を引き起こしてきた。そして、蒸気を閉じ込めた容器を破裂させる蒸気の弾性力は、温度の上昇により極めて急速に大きくなるのがわかるので、小さい弾性の蒸気を加熱するよりも、より高温の(より弾性の大きい)蒸気に熱を蓄える方が、同じ熱から極めてより大きい力学的パワーが引き出されると考えられてきた。実際は、所定の量の蒸気を作るのに必要な熱量は、その蒸気の温度に比例するのではなく、その弾性に近似的に比例するのである。そのため、大きい弾性の蒸気はそれを作るのに弾性が大きい分だけ多

表 7 蒸気の弾性についてのワット氏の実験(その 2)、1774 年

温度 ° F	弾性 インチ Hg	温度 ° F	弾性 インチ Hg
55	0.15	164	10.10
74	0.65	167	11.07
81	0.80	172	11.95
95	1.30	175	12.88
104	1.75	177 $\frac{1}{2}$	13.81
118	2.63	180	14.73
128	3.60	182 $\frac{1}{2}$	15.66
135	4.53	185	16.58
142	5.46	187	17.51
148	6.40	189	18.45
153	7.32	191	19.38
157	8.25	193 $\frac{1}{2}$	20.34
161	9.18	196 $\frac{1}{2}$	21.26

(大気圧: 29.4 インチ Hg)

量の熱を必要とする。なぜなら、実際それは、より多量の熱と蒸気が小さい空間に押し込まれているだけであり、このため、それが持つより大きいパワーは、それに比例してより多くの熱を消費することにより得られるであろうからである。

ワット氏はまた、食塩の飽和溶液が種々の温度に加熱された時に生じる蒸気の弾性についても、同じ装置を用いて同様の一連の実験を行った。彼は、この液体は純水より含まれる空気が少ないことを見出したが、それから含まれている空気を取り除くことは非常に難しいことがわかった。同じ方法で、純アルコールの蒸気について彼はもう一つの実験を試みた。これら 2 組の実験の結果は、表 8、表 9 に示されている。

表 8 食塩水溶液の蒸気の弾性

温度 ° F	弾性 インチ Hg	温度 ° F	弾性 インチ Hg
46	0.01	187	12.67
76	0.36	193 $\frac{1}{2}$	14.50
85	0.58	195 $\frac{1}{2}$	15.34
92	0.81	198 $\frac{1}{2}$	16.25
113	1.72	201 $\frac{1}{2}$	17.16
129	2.63	203 $\frac{1}{2}$	18.10
139	3.54	205 $\frac{1}{2}$	19.03
147	4.45	207	19.94
154	5.36	208	20.86
160	6.27	210	21.80
165	7.20	212	22.74
169	8.12	214	23.66
172	9.03	216	24.60
177	9.94	218	25.52
180	10.85	220	26.50
183	11.76		
大気圧 29.5 インチ			

表 9 純アルコールの蒸気の弾性

温度 ° F	弾性 インチ Hg	温度 ° F	弾性 インチ Hg
34	0.22	144	14.10
40	0.93	146 $\frac{1}{2}$	15.03
67	1.90	148 $\frac{1}{2}$	15.97
84	2.81	151	16.91
95	3.74	152 $\frac{1}{2}$	17.85
103	4.73	155	18.80
110	5.63	157	19.75
114	6.58	160	20.71
120	7.12	162 $\frac{1}{2}$	21.65
124 $\frac{1}{2}$	8.46	164	22.59
128	9.40	166	23.53
132	10.34	167	24.47
135	11.32	168	25.40
139	12.21	169	26.35
141 $\frac{1}{2}$	13.15	171	27.30
大気圧 29.4 インチ			

注釈：60 度の水は、水 100 に対して 35.42 の食塩を溶解でき、その飽和溶液は純水の 1.198 倍の重さとなるであろう。
注釈：弾性についての上記のワット氏の実験と、1796 年にサザン氏により反復された同じ一連の実験との整合性について、ワット氏は次のように述べている。ワット氏の実験は、弾性を表す全ての水銀柱高さに $\frac{2}{10}$ インチを加えるとサザン氏のものに一致する。これは、比較に用いられた彼の気圧計では、物差しが $\frac{2}{10}$ インチ低く置かれていたことによると思われる。

等重量の水と比べた、大気と同一弾性の蒸気の体積を求める実験 (p.400) 言い換えると、蒸気の所定体積に含まれる水の量を測定すること、つまり、蒸気の体積と重量の関係を求めること。熱は物体の重さには何の影響も及ぼさないので、熱によって希薄化されて弾性蒸気となったある量の液体の水は、蒸気の状態でも水の状態であったときと正確に同じ重さになるであろう。そして、現在の疑問は、大気中の空気と同じ弾性の蒸気に希薄化されるためには、水の体積はいくらに膨張させられなければならないのかということである。

この目的のため、ワット氏はブラック博士のアドバイスにより一連の実験を行った。その中で彼は約 1 ポンドの水が入るフローレンス・フラスコ(平底フラスコ)を使い、その中へ約 1 オンスだけの蒸留水を入れた。1 本のガラス管がフラスコのネック部にはめ込まれ、フラスコの中の水面にほとんど接する深さまで入れられ

た。この管は両端で開いていて、ガラス用パテで覆った荷造り用紐で包んでフラスコのネック部に固定された。このように準備されたフラスコがスズ反射オーブン (tin reflecting oven) の中に立てて置かれ、火の前にかざされて、中に入れられた水がごくわずかだけ沸騰する程度の熱を加えて徐々に沸騰させた。水から上がった蒸気は、フラスコの上部に含まれる空気より軽いので、その空気を置き換えて管から排出した。そして、最後の一滴の水が蒸発したとき、フラスコは完全に蒸気で満たされたと推定された。そして、フラスコは火から取り外され、フラスコの外側の底の部分に空気流を吹き付けて冷却され、すべての蒸気が凝縮されてその場に水滴として集められた。フラスコが完全に冷たくなった後、ガラス管が取り外され、水滴を含んだフラスコは正確に重さを量られた。

その後、そのフラスコは、水滴が完全に蒸発するまで再度加熱され、鞴 (ふいご) でその中へ空気が吹き付けられて、その内面は完全に乾かされ、フラスコ内に一切の水滴も湿分も残らないようにされた。この状態で再度フラスコの重さが量られ、以前の重さ、つまり蒸気で満たされたフラスコの重さより $4\frac{1}{3}$ グレーン少ないことが分かった。最後に、フラスコを水で満たすと、その重さは空だったときより約 7492 グレーン大きかった。ここで、 $7492 \div 4.333 = 1727$ となり、これは、等しい重さの冷水の体積を 1 としたとき、大気圧の空気と同じ弾性の沸点温度の蒸気の体積を与える。

その実験は繰り返されて、ほとんど同じ結果が得られた。3 回目で、フラスコが蒸気で完全に満たされたとと思われるとき、まだ熱い間にそれは逆にされ、ガラス管の開口部が冷水に差し込まれた。フラスコが冷やされるにつれて、冷水がフラスコの中へ吸い上げられて、やがて、ほぼフラスコを満たした。ただし、小さい空気泡が含まれていて、それは水の $\frac{1}{2}$ オンスの量に等しく、それは空気が蒸気によって完全に置き換えられていなかったことを示していた。



図 16 ワット氏の実験

以降のこの種の実験では、ワット氏は上記のようなガラス管を用いるのを省略して、フラスコをネック部が下を向くように傾けて、オーブンの中に単にフラスコを横にして置いた。そして、フラスコ内の水から上がる蒸気が、フラスコの上部のすべての空気を置き換えて、全容積を蒸気で満たすことができるように、コルクで閉じたフラスコの口の下側にノッチカットを設けて、最も低い位置に自由な通路を残した。ワット氏は、彼のすべての実験をレビューして、最後に次のように結論した。熱により希薄化された液体の水の一つの測度は、温度 212 度で高さ 30 インチの水銀柱を支えるのに十分な弾性の、1800 倍の量 (体積) の蒸気を生み出す。これに基づいて、ワット氏はその後の彼のすべての計算を行なった^{*56}。そして、後年彼は、彼の実際の経験からするとその膨張比率はこの計算よりむしろ大きいと考える理由があると述べている。しかし、より最近の実験は、この膨張比率は 1700 倍であることを示している。

^{*56} スミートン氏は上記と同じ種類のいくつかの実験を行った。直径 4 インチの薄いフローレンスフラスコを用い、最初それが空で完全に乾いている時に、その後それが水で満たされた時に、その重さを量った。それから、少量の水だけを残して残りの水をすべて排出し、そのフラスコを火の前に置いてその水を強く沸騰させた。フラスコのネック部は蒸気を逃がすために開いておいて、水の最後の一滴が消える瞬間、中の蒸気を閉じ込めるためにその口を塞いだ。このように大気と同じ弾性の蒸気で満たされたフラスコは、その状態で重さを量られ、これらのそれぞれの実験から空のフラスコの重さ (訳注：測定方法不明) を差し引いて、それらの比較からある容積の蒸気の重さに対する同容積の水の重さの比率が求まった。6 種類の異なる実験により、彼はこの比率は 2459 倍であるとした。しかし、彼は若干の空気が蒸気と共にフラスコに含まれていて、そのために実際より軽く見えるのではないかと疑って、フラスコが熱い蒸気で満たされた時に、その口を逆さまにして水の中へ入れて、セイヴァリ氏により記述された (第 1 章 p.100 を参照) のと同様に、フラスコが水を吸い上げるのを見出した。しかし、空気の小さな気泡がフラスコの中に残ったため、フラスコは水で完全には満たされず、彼は、これが全容積中の空気部分であると見積もり、そして、同じ主題についてワット氏と意見交換した後、膨張比率の彼の見積もりを 2459 倍から 1800 倍へ減らした。彼ら両方は、それ以降の彼らの計算でこの比率を採用した。

(p.401) これらの実験はあまり正確であるとは考えられていない。なぜならば、容器の重さを十分な精度で量ることは困難であり、蒸気の温度は非常に不正確であり、蒸気によってすべての空気が置き換えられたことも保証できないからである^{*57}。

蒸気を発生するのに要する熱量についての実験 1761年に有名なブラック博士により、水を蒸気に変えるには、変化後の蒸気の中にその温度により認められる熱より極めて多量の熱が水に伝えられなければならないことが発見された。その熱は蒸気の中に隠されていることから、彼はこの熱を潜熱と呼んだ。この隠された状態の熱つまり潜熱は、水が(蒸気に変化するときに)獲得する弾性的な形質の直接の原因である。たとえば、大気に開放された容器内で水が沸騰するとき、その温度は212度であり、それから立ち上がる蒸気も同じ212度の温度となるであろう。しかし、蒸気はそれ自身の中に、同じ温度で同じ重さの水より多量の熱を含んでいる。同じ温度で等重量の水に含まれる熱以上に弾性蒸気に含まれるているこの余分の熱が、蒸気の潜熱または蒸気の弾性の熱と呼ばれている。

この主題についてブラック博士自身が行った実験は、蒸気の中に大量の熱が潜在的な状態で存在する事実を証明するには十分であったが、その量を満足できる精度に測定するには、十分に正確ではなかった。そのため、ワット氏は1781年に、より慎重な注意を払って一連の実験を行った。彼は蒸気と冷水を所定の比率で混合して、以下のように実験した。水は普通のやかんの中で沸騰されて蒸気にされ、その蒸気はやかんの口から管でパンの水の中へ運ばれ、その管の先端は下へ曲げられて水の中へ差し込まれた。蒸気はそこで凝縮されて水と混合されることにより、そのすべての熱が水に伝えられた。

そのやかんは注ぎ口の半分の高さまで水が入られ、固くフィットする蓋(ふた)をオートミール・ペーストで封印してかぶせ、上の取っ手まで届く木片を挟んで下方へ固定された。その注ぎ口に銅管の一端をきつくはめ合わせて取り付け、その銅管の他端を長さ3インチだけ下方へ向けて曲げた。その銅管は長さ5フィートで、内径 $\frac{5}{8}$ インチ、銅の肉厚は $\frac{1}{50}$ インチであった。それは、やかんの注ぎ口から斜め上方へ伸び、折れ曲がった方の端は注ぎ口より約2フィート高い位置となった。その先端の口金にはコルクがはめ込まれ、コルクに直径約 $\frac{2}{10}$ インチの穴が開けられ、その穴は羽軸(quill; 羽ペンの軸)により開口部を維持した。

(p.402) 錫のパンは深さ4インチ、直径6インチであり、その中に正確に $2\frac{1}{2}$ ポンドの冷水を注いだ。この水量は、パンをほとんど深さ $2\frac{1}{2}$ インチまで満たした。パンは折りたたんだフランネルの上に支えられた。しかし、曲がった管の先端が水の中に浸けられる前に、やかんは速やかに沸騰させられて蒸気を発生して、管は完全に熱くなり、羽軸から少しも水が滴らなくなって乾いた蒸気が定常的に流出するまで待った。このような状態になってから、その管の端がパンの中の水(その温度については事前に記録)に浸けられ、出てくる蒸気は水の中でパチパチと音をたてて凝縮した。蒸気の凝縮で得た熱を分散するために、羽根で水をかき混ぜ、温度の増加を観測するために温度計が入れられた。温度が80ないし90度に達したとき、通常、実験は終了し、パンの水をすぐに円形カバーで覆った。円形カバーは、強い紙を亜麻仁油で前処理してストーブの中で乾燥したものをを用いて、水の蒸発を防止するように作られていた。そして、パンは正確にその重さを計量され、凝縮した蒸気による水量の増加量が求められた。錫のパンと紙の円形カバー自体は、完全に乾いた状態で事前に計量して差し引かれた。

通常、室温が56度の部屋の中でこのような方法で、多くの実験が行なわれた(表10を参照)。錫のパンは

^{*57} (訳注) 現在では、標準大気圧(1013.75 hPa; 温度は100 °C, 212 °F)のもとで、水の飽和蒸気と飽和水の比体積の比は、下記となっている。

$$\frac{1.67299685 \text{ m}^3/\text{kg}}{0.00104371 \text{ m}^3/\text{kg}} = 1602.93$$

表 10 蒸気の熱についてのワット氏の実験、1781 年

冷水温度 (常に 17500 gr) ° F	加熱後温度 ° F	上昇温度 ° F	凝縮蒸気量 gr	顕熱潜熱和 ° F	潜熱 ° F
43.5	89.5	46.5	760	1159.5	947.5
44.5	98	54	890	1149.1	937.1
44.5	73.5	29.5	467.5	1175.6	963.6
44.5	67.3	23	369	1158.0	946
47.5	87	40	642	1177.3	965.3
49	84.5	36	588.5	1155.0	943
47	87.5	41	675	1150.5	938.5
45	86.5	42	680.5	1166.5	954.5
45	85.5	41	664.2	1165.6	953.6

これらの実験のいくらかで、プリーストリー (Priestley) 博士がワット氏に同席。

その後乾燥されて、40 度の室内に 30 分間置かれてその温度になり、そしてパンの中へ 76 度の水 $2\frac{1}{2}$ ポンドが注がれると、その水は $75\frac{1}{2}$ 度まで冷やされた。これより、44 度の温度変化ごとに 2 ポンドの水の中でパンは $\frac{1}{2}$ 度を吸収したと結論される^{*58}。

一実験の例示；パンの中の 17500 グレーン^{*59}の水が、開始時 $43\frac{1}{2}$ 度であり、終了時に 18260 グレーンで $89\frac{1}{2}$ 度となった。したがって、凝縮した蒸気の重さは 760 グレーンであった。水の熱の増加は 46 度であり、パンに吸収される分として $\frac{1}{2}$ を見込むと、 $= 46\frac{1}{2}$ 度となる。

このような実験から蒸気の潜熱を見出す規則は、以下ようになる。熱の追加を受ける冷水の元の重さに、蒸気により引き起こされた温度の上昇量を掛ける。この積を、熱を放出した蒸気により増加した水の重さ（つまり凝縮した蒸気の重さ）で割ると、その商は、蒸気が失った温度の度合いとなるであろう。これに、それが保持する温度つまり実験の最終の熱水の温度を加えると、蒸気の全ての熱、つまり蒸気の顕熱と潜熱の和が得られる。最後に、それから蒸気の顕熱 (212 度) を引くと、残りが潜熱となる。

(p.403) このように、17500 グレーンの水 $\times 46\frac{1}{2}$ の熱の度合い $= 813750$ 、 $\div 760$ グレーンの蒸気 $= 1070$ 度の放熱。これに混合後の温度 $89\frac{1}{2}$ 度を加えて、蒸気の顕熱と潜熱の和として $1159\frac{1}{2}$ を得る。そして、顕熱 212 度を引いて、この実験による蒸気の潜熱として $947\frac{1}{2}$ が残る。他の実験でも、先の表に示されているように、ほとんど同じ結果となった^{*60}。

^{*58} (訳注) 実験では冷水の温度上昇が概ね 40 ~ 50 度であることから、ワットは、計測した温度上昇にパンの熱容量の影響として 0.5 度を加えて"温度上昇"としている。ワット当時の知識をもとに、本文中の数値からパンの水当量 (質量と比熱の積) m_0 を求めると、 $m_0 = \frac{2.5 \times (76 - 75.5)}{75.5 - 40} = 0.0352 \text{ lb} = 246 \text{ gr}$ となる。

^{*59} (訳注) 1 gr (グレーン) $= \frac{1}{7000} \text{ lb (常用)} = 0.06479891 \text{ g (SI)}$

^{*60} (訳注) パンの水当量を m_0 、冷水量を $m_1 = 2.5 \text{ lb}$ 、蒸気量を m_2 、冷水の初期温度と最終温度を t_1 、 t_3 とし、蒸発潜熱を Q_l と表すと、熱量収支 $(m_0 + m_1)t_1 + m_2(212 + Q_l) = (m_0 + m_1 + m_2)t_3$ より

$$Q_l = \frac{(m_0 + m_1 + m_2)t_3 - (m_0 + m_1)t_1}{m_2} - 212 = \frac{(m_0 + m_1)(t_3 - t_1)}{m_2} + t_3 - 212$$

として、実験により忠実に蒸発潜熱が求まる。求まる蒸発潜熱の平均は 953.6 °F となり、ワット氏の値より 4 °F 程度高い結果となる。

このセットの別の二つの実験は、他の実験より著しく小さい結果を与えたので除外された。採用された実験の平均は、潜熱として 949.9 を与える。4 ないし 6 分間続いた各実験が進行する間、錫のパンおよびその中の水から、周囲の空気へ伝わる熱に対して、計算上の斟酌(しんしゃく)は行われていなかった。このため、この決定は本来の値よりむしろ低い値であり、結果としてワット氏はその後、温度 212 度で水銀柱 30 インチに等しい弾性の蒸気の潜熱として、960 を採用した^{*61}。

または、より正確な表現で、温度 212 度の任意重さの蒸気は、同じ 212 度の温度の等しい重さの水より、はるかに多くの熱を潜熱状態で含んでおり、その重さの水の温度を 1 度上げる操作を 960 回行うことができるだけの熱を含んでいる。

注意：もし、熱の量についてそれは何々度であると言うのであれば、その熱量を吸収してその温度まで上がる物体の物質の種類と質量を指定しなければならない。この条件がなければ、温度計は熱量の測度となることはできず、また、潜熱が 960 度であると言うことは、不適切な表現である。なぜなら、実際その数 960 は、ある量の熱で 1 度だけ温めることのできる水の量を表すだけであり、その効果を引き起こす能力により熱の量を表示しているだけであるからである。

ワット氏はまた、1765 年に低温の蒸気の潜熱についていくらかの実験をし、1783 年にそれらを繰り返した。しかし、正確な量を決定するのに十分な精度ではなかった。彼は、水が真空中では 146 度の温度ですばやく蒸発することを見出し、彼はその場合の蒸気の潜熱は約 1000 であると推定した。彼は他にいくらかの粗い実験を行い、蒸気の全ての熱(つまり蒸気の潜熱と顕熱の和)はすべての温度と弾性のもとで一定の値であると仮定するようになった。この仮説はむしろ、後継の実験者たちにより確かめられた。

ワット氏は、以下の方法で真空中で水の蒸留の実験を行った。彼は密閉容器またはボイラで構成された小さい蒸留器(still)を作った。その蒸留器は錫の板で作られて、その外周容器との間に入れた水で周囲を囲まれ、加熱皿の上に置かれて加熱されて水を沸騰させた。内部の容器つまり蒸留器の中に入れられた水に一樣に熱を伝えるために、外周容器内の水で水浴槽を形成していた。一本の管が蒸留器から出て、そこで発生した蒸気を密閉した冷却器つまり凝縮容器へ運んだ。冷却器も錫の板で作られ、二つの円錐の底面と底面を繋いだ形をしていた。一つの実験を行う間、この冷却器は既知温度の既知量の水を入れた錫パンの中に完全に沈められた。

蒸留器から管を通して来る蒸気の中に潜在する熱の量は、冷却器を囲むこの水の温度上昇から推算された。蒸気量は冷却器に集められた凝縮水の量から決定され、その水の温度が記録された。

実験を始めるために、1 パイント^{*62}の水が蒸留器に注がれ、外側の水浴槽にも大量の水が注がれた。冷却器はまだ、水の容器内に沈められていなかった。そして熱が加えられて蒸留器内の水は非常に急速に沸騰して蒸気を発生し、装置のあらゆる部分から空気抜き用の穴を通じて空気を排出した。空気が完全に排除されて装置の全ての部分が非常に高温になったと思える時、これらの穴は塞がれ、蒸留器を完全に覆うように水浴槽に水を満たして装置を冷却した。この冷却により装置内の排気(減圧)が行なわれ、そして、冷却器の錫やその他の全ての部品が、その中の希薄な蒸気と同様に、蒸留器を囲む水浴槽の水と同じ温度になったと思えるまで装置は保持された。この間、これまで冷却器はその中の蒸気より熱かったので、その蒸気を一切凝縮していなかったであろうから、この間では冷却器内には凝縮した水は含まれていないと考えられた。

(p.404) この状態で冷却器を収めた錫パン(直径 $8\frac{3}{4}$ インチ、深さ 6 インチ)に、当初 $51\frac{3}{4}$ 度の水 62800 グレーンが注がれ、冷却器は完全にその水中に沈められた。一方、蒸留器周囲の水浴槽の水の温度は 134 度に均一に維持されるよう意図されていたが、その実験の 9 分の間に増加して最終的に 158 度となり、平均は 146 度となった。この温度で、蒸留器の中の水は常に沸騰して、希薄な蒸気を管を通じて冷却器の中へ送り続け、そこで、蒸気は周囲の冷たい水にその潜熱

^{*61} (訳注) 現在では、標準大気圧 (1013.75 hPa ; 温度は 100 °C, 212 °F) のもとで、水の蒸発潜熱は、

$$2256.9 \text{ kJ/kg} = 539.1 \text{ kcal/kg} = 970.3 \text{ Btu/lb}$$

となっている。

^{*62} (訳注) 1 pint(パイント) = 0.56826125 リットル

を伝えることにより凝縮した。そのため、実験の終わりでは、その冷却器まわりのパン内の水の温度は $9\frac{1}{4}$ 度上がって 61 度となった。

ここで、冷却器まわりの水のパンが取り外され、蒸留器の中に空気が入れられて蒸留に終止符が打たれた。蒸気から凝縮されて生じた水が冷却器から排水され、その温度は 62 度であるとわかった。その重さは 534 グレーンであり、他に排水されない分の余裕を考慮に入れるために、それに 6 グレーンが加えられて 540 グレーンと判断された。

錫の板でできた二つの円錐形の冷却器は 1000 グレーンの重さであり、水の比重の約 $7\frac{1}{2}$ 倍であるので、その体積は $134\frac{1}{2}$ グレーンの水の体積に等しい。錫の熱容量は同じ体積の水の熱容量の約 $\frac{3}{4}$ 倍であるので、この円錐の金属は、同じような条件で 101 グレーンの水と同量の熱を吸収するにちがいない。その温度は最初 134 度であったが、冷却器の水により 62 度まで冷やされたので、72 度を失ったことになる。この熱が水に伝えられたので、円錐に等価な水量 (101 グレーン) が 62800 グレーンから引かれなければならない、したがって、冷却水量は 62699 グレーンとなる^{*63}。

これに、その冷却水が含まれているパンの錫の等価量、または少なくとも水に接触している錫の一部分の等価量が追加されなければならない。これは 9600 グレーンの重さであり、水 1280 グレーンの量に等しかった。しかし、その熱容量は水の等価量のわずか $\frac{3}{4}$ であるので、960 グレーンの水が錫のパンが吸収したのと同じ量の熱を吸収したことになる。

これより、加熱される水の総重量は、 $(62699 + 960 =) 63659$ グレーンであると計算されなければならない。前の規則に従って、これは、上昇温度 9.25 度を掛けられなければならない、 $= 588\ 846$ となり、この積は凝縮水量 540 グレーンで割られて 1089 となる。それに、凝縮した蒸気の温度 62 度を加えて、顕熱と潜熱の和として 1151 を得る。これは、前の実験のものと同様である。または、顕熱 146 度を差し引くことにより、蒸気の潜熱として 1005 が得られる^{*64}。

ワット氏は次のように論評している。

「私は、この実験の正確さに決して満足してはいない。実験により確かめられるべきあまりに多くのことが推測で行なわれており、また排気の程度は、できたであろう程には、または他の実験でできた程には、十分ではなかった。真空は、繰り返し水を沸騰させ蒸気を凝縮し空気を除去することにより、より完璧になり、蒸留が 70 または 80 度で起こる程度にまで行なわれるべきであった。

熱のための冷却器の容量は、正確に吟味されなければならなかった。そして、各実験の前後に冷却器の重さを量り、内部に付着する水の量を確認するためには、冷却器が蒸気配管から取り外せるように作られるべきであった。」

1783 年の上記の実験の間、デリューク (de Luc) 氏はワット氏に付き添った。

同じ重さの蒸気 (つまり蒸気の状態の水) は、その蒸気の温度と弾性のいかにかわらず、常に同じまたはほぼ同じ値の熱量を含むということが、最もあり得るものである。その熱の一部は温度計で感知できるものであり、蒸気の弾性を引き起こす。一方、残りの熱は蒸気の中に隠れている、つまり温度で感知されない熱であり、液体の水の状態から弾性蒸気への体積の膨張を引き起こす。

体積の膨張がより大きいほど、潜在的な状態の熱量はより大きくなければならないことになる。また、体積がより大きいとき弾性はより小さくなり、潜在的な状態の熱量がより大きいとき顕熱状態の熱の量はより少なくなる。

(p.405) 注釈：これは、蒸気は液体の水に接触していて、熱を受ける水と蒸気其自然の配置を満たすように、自由にその水を吸収溶解することができるかと仮定している。そのとき、蒸気は水で飽和している言うことがで

*63 (訳注) この記述はひとつ前の文と矛盾しており、誤っている。

*64 (訳注) ワット (またはファレイ) の行った蒸発潜熱 Q_l の計算式は、

$$Q_l = \frac{(62800 \text{ gr} - 101 \text{ gr} + 960 \text{ gr})(61^\circ\text{F} - 51.75^\circ\text{F})}{540 \text{ gr}} + 62^\circ\text{F} - 146^\circ\text{F} = 1005^\circ\text{F}$$

である。

前記の冷却器の熱容量の扱いを訂正すると、熱収支

$$(540 \text{ gr})(Q_l + 146^\circ\text{F} - 62^\circ\text{F}) + (101 \text{ gr})(134^\circ\text{F} - 62^\circ\text{F}) = (62800 \text{ gr} + 960 \text{ gr})(61^\circ\text{F} - 51.75^\circ\text{F})$$

より、

$$Q_l = \frac{(62800 \text{ gr} + 960 \text{ gr})(61^\circ\text{F} - 51.75^\circ\text{F}) - 101 \text{ gr}(134^\circ\text{F} - 62^\circ\text{F})}{540 \text{ gr}} - 146^\circ\text{F} + 62^\circ\text{F} = 994.7^\circ\text{F}$$

きるであろう。

蒸気に関するワット氏の研究を以下のように結論してよいであろう。彼の実験の結果は、彼自身にとっても完全に満足できるものではなく、そのため彼はその後数年間、そのすべてを反復しているが、彼の推論は正しかったように見える。そして、彼の導いた値にわずかの精度の不足があったとしても、原理の実践への適用においてはまったく影響しなかったにちがいない。上に記録したワット氏の実験すべては、実務に携わる技術者の安全なガイドとして、正確な真実に十分に近いものである。しかし、本書の他の部分においては、蒸気よりも正確な実験に従って表が計算されるであろう。

ワット氏の実験は、1821年の"ロビソン博士の回顧録"での彼の注記が出るまで、出版されなかった。また、フランスのベッテンコート (Bettancourt) 氏が種々の温度での蒸気の弾性についてのシリーズの実験を発表した1790年まで、蒸気の実験の出版物は皆無であった。