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

序文、総目次、導入

(邦訳 S. Yamauchi)

2019 年 11 月 20 日

目次

1 **蒸気機関** 8

2 **蒸気とその応用方法について** 15

3 **力学的原理の定義** 20

3.1 物質 20

3.2 運動 20

3.3 アイザック・ニュートン卿により確立された三つの力学的公理つまり運動の法則 21

3.4 慣性 (inertia) 21

3.5 力 (force) 21

3.6 平衡 22

3.7 圧力 22

3.8 力学的パワー 23

3.9 運動する物体のエネルギー 24

3.10 勢い 26

3.11 質量の尺度 26

4 **落下物体の加速運動の法則** 28

4.1 重心 31

4.2 直線運動 32

4.3 曲線運動 32

4.4 自由な運動 33

4.5 拘束運動 33

4.6 円運動 33

4.7 遠心力 34

4.8 求心力 34

4.9 円運動する物体の有効速度を求める方法 36

4.10 円運動する物体の回転半径 . . . 36
4.11 重い物体に異なる速度を伝達するために必要とされる力学的パワーの量 . . . 37
4.12 一様断面の棒 . . . 39
4.13 回転円板 . . . 43
4.14 振り子 . . . 47
4.15 回転振り子または遠心振り子 . . . 51

5 力学的パワー 54
5.1 てこ . . . 55
5.2 輪軸 . . . 56
5.3 プーリ . . . 57
5.4 斜面 . . . 58
5.5 くさび . . . 58
5.6 ねじ . . . 59
5.7 「ケーブル作用」 . . . 59
5.8 静水圧作用 . . . 60
5.9 力学的パワーの組み合わせ . . . 63
5.10 機械、機関、ミルの用語 . . . 64
5.11 機械装置 . . . 65
5.12 駆動力 . . . 65
5.13 抵抗力 . . . 67
5.14 摩擦 . . . 69
5.15 プリポンデランス (Preponderance) . . . 72
5.16 機械の運動速度を決定する条件 . . . 73
5.17 力学的効果 . . . 74
5.18 機械によりなされる力学的パワーの標準尺度 . . . 74
5.19 機械における効果の最大値 . . . 75

6 種々の条件下での蒸気の性質の記述 77
6.1 蒸気の性質 . . . 77
6.2 蒸気の熱量 . . . 77
6.3 蒸気の熱量の標準値 . . . 79
6.4 蒸気の密度 . . . 80
6.5 種々の温度での蒸気の弾性力 . . . 81
6.6 蒸気の密度の標準値 . . . 84
6.7 種々の条件での蒸気の密度の法則の可能性 . . . 85
6.8 空気の熱膨張の法則 . . . 87
6.9 種々の温度と弾性における蒸気の密度 . . . 88

序 文

(p.viii) イギリス国民が過去半世紀で達成した高度な富と文明は、蒸気機関のパワーを人力の助けを借りて有用なアートに適用することにより、大いに増進された。未文化の社会状態では、上流階級が消費する全てのものは、多くの人口の没落と奴隷化により達成されなければならない。なぜなら、労働者階級の産業が系統的に適用されて機械の使用による助力を受けない限り、社会の知識階級を維持するためのごくわずかの余剰の富しか得られないからである。余剰の富は一般に裕福な状態を作り出し、文明化の進行と知性の発展に導くものである。

風や水の流れの自然のパワーが、労力を必要とする動作を容易にするために応用されるようになったのは、比較的最近のことである。しかし、前世紀の初めに、風力や水力の一般的な応用に加えて、イングランドの機械の法則にひとつの新しい要素が投げかけられて、大きな成功を収めた。この巨大な補助者と、それが生み出した製造・通商の改善されたシステムとにより、労働の生産性が大きく増大した。そのため、以前は共同社会の第一階級の特質のひとつであると考えられていたこれらの生活の利便性と富の帰属は、今や、新たな中産階級にも属するようになったことが認められる。中産階級は、それまでの手仕事に代わって、知性を有益な産業に応用する労働者から構成される。

この変化は社会の状態に大きな進歩を生じた。このように作り出された人工的な要求を満たしたいという欲求は、その中産階級の間で知性の大きなエネルギーと知識の活発な行使とを引き起こし、そのことが社会全体へ文明化の高い状態を作り出すように影響を及ぼした。その結果として、習慣、様式や情操の洗練化をもたらした。これらは、富と知識が広く一般に拡散することでしか生じ得ないものである。労働者階級の状態は同時に大いに改善され、一般の人々の間で今活発に息づいているその教育システムにおける忍耐力により、より急速な改善が続くであろう。

それほどまでに重要で有益な発明の起源と発展の歴史が、すべての知的探求者の興味の対象とならないはずがない。蒸気パワーの応用により有益な結果を得る際の原理は、製造業に関わるすべての人にとって詳細に学ばれるべきものであり、そうすれば、(その多くは既になされているが、) それらの機械類の新たな応用の多くの機会があることが分かるであろう。

この論文の目的は、蒸気機関とその応用について歴史的、実用的、記述的に説明することである。

歴史的部分では、その発明の最初の起源から完成した現在の状態まで完全な説明を行うことを意図した。その説明により、政治家や政治経済学者は、蒸気パワーの採用が過去 1 世紀間に国家の繁栄と進歩に及ぼしてきた影響を見ることができるであろうし、同じ原理をより広く応用することにより見込まれる将来の利益の考えを持つことができるであろう。

実用的・記述的部分では、蒸気機関を建造して使用する実際と原理について、専門的学生のための教育コースとなることを意図した。現在、このような学生は彼ら自身の粗雑で不完全な観測を行って消化するままに放置されていて、科学的なガイドが不足しているために、彼らの結論は誤った解釈や間違った仮定を伴いがちである。この同じ部分は、表の使用や計算の定理により、経験豊かな専門的技術者の実務経験を活用したマニュアルを作り上げることをも意図している。蒸気機関を採用して種々の目的に応用しようとしているが、その建造の完全な知識がないためにこれまで到達困難であった情報を必要としている、技術者やその他の人々の業務の完遂に、このマニュアルは役立つであろう。蒸気機関の動作が依存する力学的および化学的作用の原理、およびこれらの原理の実際への応用も、この部分に含まれるであろう。

(p.vi) 他の部分では、蒸気機関の改良のために提案されたすべての思索的なプロジェクトの記録と簡単な説明を含んでいる。これは、その目的にために暗示された種々の案を、機械の発明家たちに示すためである。発

明の偉大な着眼点の源となっている周囲環境の歴史と合わせて、本論文の他の部分から得られる教訓は、その機械の更なる改良を可能にするかもしれない。

これらの目的を達成することは、簡単な仕事ではない。なぜなら、十分な情報が得られているのは、活発な専門的な実務のコースにおいてだけであるからであり、すべての有能な技術者は、書籍を著す時間を工面するには余りにも忙し過ぎる。もし、著者が最初にビジネスに入るときに、計画を練らずにその実行の資料を集めなかったならば、著者は本書を著述することができなかったであろう。また、著者が展望としてこのような目的を持っていたことが知られていたので、書籍の編集を望んでいた多くの技術者たちから、著者は常に情報の提供を受け続けた。そして、このように感じることは、非常にまれな例外を除いてこの専門職の間では一般的なものである。このようにして、機械のこの分野の二人の偉大な大家である、先のワット氏およびウルフ氏と個人的に知り合いとなり、著者は彼らから、それぞれの発明の起源と進展、およびそれらの発明を有益な実用に応用する際に従うべき原理に関する十分な知識を受け取った。

1805 年および 1806 年にこの専門的研究を開始するに当たって、著者はこの種のガイドが不足していると感じて、ブリタニカ百科事典のロビソン (Robison) 博士の記事と、プロニー (Prony) 氏の "Architecture Hydraulique" とを注意深く検討し、その目的にはそれらは不十分であることが分かった後、著者はすべての観察と発明のノートを保存すると決めた。そのノートにより著者は、蒸気機関や他の機械の建造や操作原理とその種々の応用とについて、著者自身の知識を獲得してきたものである。これはいつか将来、この資料をもとにして有益な出版がなされるかも知れないことを期待してのことである。職業上の興味が以来長く常に、そのような目的に専念できたかもしれないすべての時間を占めてきたが、その目的が放棄されたことはない。そして、本書の販売により、出版社が同様の性質の他の書籍を引き受けるようになることが十分に証明されたならば、作者はメモを蓄積しているので、何年かのうちに、本書と同じような形で整理する時間を見つけることができるかもしれない。

1815 年に著者は、"Dr. Rees' Cyclopaedia" のために蒸気機関の描写的記事を書いた。しかし、その仕事のプランと銅版画の数が限られていたことで、実用的な論文では大きな価値となるはずの詳細を避ける必要があった。その記事の出版は 1816 年であったので、蒸気パワーがの益々広範に使用されるようになったことにより、正しいマニュアルの欠如はなおもより強く感じられ、著者は専門家の友人から元の計画の実行のアドバイスを受けた。このようにして著者は 1820 年に取りかかって歴史的部分の本体を書き、翌年に前の ローリー (Lowry) 氏により 銅版画のほとんどが彫られた。しかし、著者は契約によりロンドンから離れた場所に住まざるを得ず、このため、その目的のための時間がなくなってしまい、印象が途切れがちになり、その出版が不可避的に現在の時点まで延びてしまった。

(p.vii) 学生の教育のためには、蒸気機関の主題へ直接応用できるように、機械の初歩的な命題 (proposition) を述べることが必要である。この目的のために、現在の巻の「導入」の中で、一連の定義を与えている。これらの定義は、機械の理論についての最良の執筆者らの著書をフルに吟味して行った。すなわち、ベリドー (Belidor)、エマーソン (Emerson)、スミートン (Smeaton)、ハットン (Hutton)、バンクス (Banks)、グレゴリー (Gregory)、ロビソン (Robison)、ヤング (Young)、その他である。著者は、幾何学または代数学の言葉を用いずに、彼らの推論方法と彼らの結論の数学的厳密性を保持するように努めた。しかし、全ての量は数値で表示され、それらの比率は算術の通常の方法で求められている。この計画は、他の方法による計算に慣れていない人々に対して、原理を極めて明確に表現する目的で採用された。本書のこの部分は、実務に携わる人々が行う作業が従うべき正確な原理の知識を、彼らに与えることを意図している。そして他の部分では、蒸気機関の建造と使用における彼らの日々の実務に、これらの原理を応用する手段を示すことを意図している。

数学的探索になれていない読者にとって、命題を記述する方式は十分な証明になっていないと思えるかもし

れない。しかし、説明し (証明するのではなくむしろ) 定義しようとしている原理は、数学的証拠によりその真実性が疑う余地がないと確立されているのであり、読者は、その原理を扱っている数学的書籍を参照するのが良いであろう。

グレゴリー博士の "Treatise of Mechanics", 全 2 巻, 八つ折り判 は、数学的探索の最良のコレクションを含んでおり、その原理のもっとも完全で明確な説明は、ヤング博士の "Course of Lectures on Natural Philosophy", 全 2 巻, 四つ折り判、または、ブリュースター (Brewster) 博士による"Encyclopaedia Britannica"、全 4 巻、八つ折り判の、ロビソン博士 "Mechanical Philosophy" に関する記事の中に見つかるであろう。若い学生に対して、前述の数学コースを強く勧める。最良のガイドは、マーチン (Martin) の "System of Mathematical Institutions", 全 2 巻, 八つ折り判、ハットン博士の "Course", 全 3 巻, 八つ折り判、およびグレゴリー博士の "Mathematics for Practical Men" である。

本書のひとつの大きな目的は、実務技術者に対して、蒸気機関の建造と使用に際して知っておくべき比率および値を計算する、一連の計算規則を身につけてもらうことである。これらの規則は、すべての種類と大きさの蒸気機関と水車について行った膨大な数の観測から導かれたものである。それぞれの場合、観測結果は非常に注意深く比較され、条件の相似性に応じて一連のシリーズに整理された。そしてそれより、シリーズのすべての部分に等しく良く合致する結果を与える公式が導かれた。これらの公式の作成は、探索の結果だけが数学的規則の形で保持されているので、表面にはほとんど現れないが、極めて労力を要する仕事であった。この規則の大部分は、著者自身が専門的実務で使用するために作成し、数年のコースの間で継続して応用のテストを受けてたびたび訂正された。著者は、それらの精度についていくらかの確信を持っていると主張することは正当であろう。

それぞれの規則で計算された様々な値の比率を制御する原理は、代数的な方法を用いずに選ばれたもっとも簡潔な用語で述べられている。代数や流率 (fluxion) の方法は、公式を探求するのに必要なだけであり、計算は通常の算術により数値を用いて行われるので、この本を通じて、代数的方法は避けている。実務での使用では、要求された結果を得る計算規則を用いることで十分である。

(p.viii) それぞれの計算を計算尺で行う方法が追加されていて、それは、計算を容易にするであろう。この価値ある道具は、ワット氏により技術者らの間で広く使用するように導入され、一般的に用いるためには、計算式を集積することだけが必要とされる。著者はこれまでに行ったことが、その優れた計算方法 (計算尺) の使用が専門家の間で普及することに、貢献すると期待している。

蒸気機関とその応用の発明の歴史は、章に分けられている。第 1 章では、17 世紀の間に火から動力 (moving power) を取り出すためになされた種々のプロジェクトと試みの説明、および揚水のための最初の実動の、しかし決して広く使われることはなかった、セイヴァリ氏により発明された機関を含んでいる。

第 2 章では、重要な実用に供された最初の機関であり今なお広く用いられている、ニューコメンの火の機関の発明、原理、および構造を扱う。この主題は詳細に取り扱われており、その各部品の比率に関する規則が提示されている。

第 3 章は、ニューコメンの発明以降の最初の半世紀間になされたその種々の応用を扱っている。

第 4 章は、機械の建造への鋳鉄の導入と火の機関の製鉄への応用を扱っている。

第 5 章は、ワット氏の揚水のための彼の最初の蒸気機関の発明の起源と進展の歴史を扱っている。この機関の説明、および彼がその部品の比率について彼が見出した規則の説明も含んでいる。

第 6 章では、蒸気機関を用いて製粉機に連続な回転運動を与える最初の応用の説明を行う。その目的のためのワット氏の回転機関の原理、動作および構造の完全な記述も含んでいる。また、彼自身によるいくつかの標準機関の寸法も含んでいる。その標準機関はは長い間使用され、蒸気の同様の応用法に従っている現代の機

関と同様に、良好に動作している。
第 7 章は、蒸気機関に関連した計算目的のための、計算尺の仕組み、使用法および応用の論文である。
第 8 章は、ワット氏の回転機関の部品の比率と寸法の計算のための、規則の集積である。
第 9 章は、蒸気機関の発明の歴史の続きであり、ワットと同時代人たちによる彼の機関の改良を記述している。
この巻では、蒸気機関のすべての動作原理が完全に展開されてそれが実用化され、発明の歴史の中でひとつの完成度に到達した時点までを扱う。これらの機械の建造技術は、ワット氏の時代以来非常に大きく改良され、その応用は広範に広がったが、実用面では、高圧機関、特にウルフ氏の高圧機関を除いて重要な発明はなされなかった。ウルフ氏の機関は、彼が最初に作った同じ形のまま今も使用されている。この主題の残りの部分は、現在使用されている、最良の技術者により作られている蒸気機関の構造についての技術的記述で構成され、この部分とそれらの種々の応用、およびこのような応用を行うに際して従うべき原理は、次の巻の主題を構成することになる。

総 目 次

第　I　章　火により駆動される機械の起源について
第　II　章　大気圧機関とよばれたニューコメンの火の機関、1710
第　III　章　種々の用途への大気圧機関の応用
第　IV　章　製鉄等への蒸気機関の応用
第　V　章　ワット氏の蒸気機関、1769
第　VI　章　回転運動への蒸気機関の応用
第　VII　章　蒸気機関各部品サイズ計算のための計算尺の使用
第　VIII　章　種々の出力のワット氏回転機関部品の比率・サイズの計算方法
第　IX　章　同時代人によるワット氏機関の改良
図版 (銅版画)

導 入

1 蒸気機関

(p.1) **蒸気機関**は駆動力 (moving force) [*1]を取り出す複合機械であり、アートおよび工場生産で様々な有用な作業を行う他の機械、ひき臼または機関に運動を与える primum mobile つまり原動機 (first moving power) である。英国では、この蒸気機関は、ホース・ミル (horse-mill)、風車または水車が使用可能なすべての目的に対して、非常に広い範囲で使用されている。ホース・ミル等では有効ではない幾つかの作業は、蒸気動力により容易に実施されている。

蒸気機関の機械的な力またはパワー[*2]は、熱により水が弾性蒸気中へ膨張つまり希薄化し、さらに、冷却によりその蒸気が水の中へ収縮つまり凝縮することより得られる。それは、実際には、水を沸騰させて蒸気にする火により行われるので、かっては火の機関 (fire-engine) と呼ばれていた。

蒸気機関を "最初に動く機械またはパワー" として扱う際に、それにより動かされる二次的な機械とは区別して考えなければならない。あらゆる場合、原動機 (first mover) は力学的なエネルギーまたは力を授けられなければならず、それを用いて何らかの二次機械を駆動し、二次機械の動作により引き起こされる抵抗[*3]に抗してそれに運動とパワーを与えなければならない。そして、ここで、原動機は自身が動作するための力を実際に作り出すのではなく、何らかの自然の原因から生じる力を集めて濃縮し、そこから運動を引き出すよう調整されたものであることに注目しなければならない。そして原動機は、このような運動や力を修正し、繋がれた二次機械にその運動や力を適切な方法と方向で伝達するための部品で、構成されなければならない。

家庭用に揚水するために井戸に取り付けられている一般的な手動ポンプは、二次機械とその原動機の身近な例である。ポンプのレバーつまりハンドルを操作する人間は、その筋力によりポンプを動かすのに必要なパワーと運動を提供しているので、原動機である。ポンプは、揚水するという要請を果たしている唯一の二次機械である。もし蒸気機関がこの目的のために使われるとすると、それは人間と置き換えられることになるであろう。人間の筋力の代わりに、沸騰する水の蒸気の膨張および収縮と言う性質が蒸気機関に適用されて、機関の部品に運動を引き起こし、これらの運動部品がその動きをポンプのハンドルへ伝え、それを交互に持ち上げて下ろして揚水するように用いられるのである。

他の例として、石臼、麦芽製粉機、または (旋盤の) はずみ車 (turner's wheel) を回転させ続けるために、一人の労働者が雇用されていると仮定する。彼はそれを回し続けるために、砥石または車輪の軸端のウィンチ・ハンドルに手と腕の力を加えなければならず、そしてすばやい運動が、回転する車輪からエンドレスの帯や紐により、旋盤や他の機械へ伝達されるであろう。この場合も、その人間が原動機であり、丸砥石、製粉機または旋盤が二次機械である。人間の代わりに蒸気機関が用いられるならば、それは、連続した回転運動を与えるように、車輪のハンドルまたはクランクに取り付けられるであろう。

(p.2) ボートを漕ぐ人または乗合馬車を引く馬、および穀物製粉機の丸砥石を動かす風車のセールまたは水車は作業機械を駆動するので、原動機の例として挙げることができるであろう。それらは今日のように、蒸気

[*1] (訳注)「動力」と解してもよいが、moving power と区別するために、moving force または motive force を「駆動力」、moving power を「動力」と表す。

[*2] (訳注) パワー (power) という用語は、現在では単位時間の仕事 (仕事率または動力) の意味で用いられているが、本書 (の当時) では、現在の「力」、「仕事」、「動力 (仕事率)」等の意味で、多少曖昧に用いられている。当時はこれらの概念の間の明瞭な区別が、なされていなかったものと推測される。そのため、この翻訳では多くの場合そのまま「パワー」と訳した。

[*3] (訳注) その機械に加えられる負荷の意味で、抵抗 (resistance) の用語が用いられている。摩擦抵抗、空気抵抗等の意味と紛らわしいが、以下そのまま**抵抗**と記す。

機関により同様に駆動することができる。

原動機は、あらゆる機械の要素または構成部品として記述されて通常「力学的パワー」と命名されているものとは、区別されなければならない[4]。これらの力学的パワーは、てこ、プーリ、輪軸、くさび、斜面、ねじ、および現代の他の二つの発明である。しかし、これらの力学的パワーは組み合わされて変更されるが、それらは動力 (moving power) の作用を単に修正し、操作する対象物に効果的となるようにその力を伝えるだけである。しかるに、力学的パワーの作因またはそれらの組み合わせは、適切な方向へ必要な力と速度を用いてそのパワーを伝えるために必要であるだろうが、動力は、作用を行うための運動と力の自然の原因を含んでいなければならない。たとえば、今述べたポンプの場合では、人の腕の力をポンプのバケットに伝えるために一本のてこが用いられ、力学的パワーの介在により、人により与えたれた運動の方向が逆転され、加えられた力が大きく増加される。しかし、力が増加したのと同じ割合で運動の量は減少するので、力学的効果 (言い換えると、ポンプによる揚水量) は、てこの使用によって増加しない。人は、なおも原動機である。もし、彼がてこを用いずにポンプのバケットに直接力を加えて、鋸が動作するように手でそれを引き上げるのであれば、簡便ではないが、彼はてこを用いた通常の方法と同じように、同じ程度の疲労で同じ揚水効果を作り出すことができるであろう。

ホース・ミル、風車、水車および蒸気機関等のより複雑な原動機は、動物、風、または蒸気の最初の駆動力を、ポンプ、砥石、石臼、鋸、および他の様々な二次機械に適切な方式で伝えて、望むよう動作させる目的のために種々に組み合わされた様々な力学的パワーで構成されている。

本書は、蒸気機関を、他の作業機械を駆動するのに必要なパワーと運動を生み出すの用いられて、それ自身完全な原動機 (first moving machine) として扱うことを意図している。しかし、蒸気パワーの応用の最も印象的な例のいくつかを除いて、力学的パワーを有益な作業に用いているこれらの二次機械の描写を行うことは考えていない。

蒸気機関は、人類の英知と産業に高度に恩恵を受けた発明である。なぜなら、それは、生活のアートへの哲学的原理の最も価値ある応用であり、歴史に記録されたいかなる発明による影響よりもより大きくより一般的な変化を、実際の機械にもたらしたからである。

(p.3) 大工や鍛冶屋に用いられる軸、鋸、およびその他の簡単な道具は、踏みすき (spade)、すき (plough)、および荷物を運ぶための牛馬の応用と同様に、早い時期に発明されたので、それらは半神半人の製造物であると考えられてきた。しかし、この簡単な用具や機械が発明された後の長い期間、人々はすべての労働を彼ら自身の個人の力で行うことを余儀なくされた。木の伐採や水の汲み上げなどの最も品位を下げる労働は奴隷の仕事とされ、一方、とうもろこしを打って挽くことは、糸とを紡いで布を織ることと同様に、常に女の仕事とされた。改良された現在の状態へ向かう次の進歩は、牛馬の活用であった。シケリアのディオドロス (Diodorus Siculus) によると、ミネルヴァは牛をすきに繋ぐことと、とうもろこしを挽くために馬を製粉機のレバーにつ

---

[4] 機械の理論の著者たちの記述によると、機械は、ある作業 (work) の成績を向上するために、作業者または自然作用因と行われるべき仕事との間に挿入される器官または器具である。何らかの力学的な発明がなければ、そのような作業は、提案された条件下では不可能ではないにしても困難であったであろう。このような機械は、主に次の三つの理由により挿入される。

(1) 第一に、打ち勝つべき抵抗の方向に合わせて、駆動力の方向を調整するため。

(2) 第二に、ある速度を持つパワーを、異なる速度の仕事を行えるようにするため。

(3) 第三に、ある強さの自然のパワーを、より大きな強さの他のパワー、障害または抵抗に対してつり合って打ち勝てるようにするため。

これら三つの目的は、異なる方法で達成される。つまり、てこ、プーリおよび輪軸のように、ある一定の支持された中心回りに回転する機械によるか、または、斜面、くさびおよびねじのように、それに沿って抵抗力または物体の運動が生じる一定の軌道または通路を持つ機械によるか、のいずれかである。複合機械は、これら 6 種類の力学的パワーの特有の組み合わせである。("Gregory's Mechanics", II. p.1 による)

なぐことを、最初に教えたため、ブーレミア (Boormia) の名前のもとで崇拝された。

人間の労働を助けるために、次に自然の要素が呼び出され、風と水のパワーが製粉機を回すのに用いられた。テッサロニカ (Thessalonica) のアンチパーター (Antipater) は女性にこのように呼びかけた。「婦人たちよ！これまでとうもろこしを挽く仕事をしてきた汝たちは、将来のために腕を休めなさい。鳥たちが歌って夜明けを告げるのは、もはやあなたたちのためではない。ケレス (Ceres) は、あなたたちの労働を果たすために、川のニンフに重い粉挽き臼を動かすよう命じた。」しかし、これらの発明は非常に有益ではあるが、多くの達成すべき課題を残した。なぜなら、水の落下はある条件下で見出されるのみであり、「風は気が向くところに吹く」からである。

人間が意のままに使えるパワーを発見することは、18 世紀の蒸気機関の発明者のために取って置かれた。このすばらしい発明の進展は急速であったので、その最初の起源から 1 世紀も経たないうちに、それはアートとマニュファクチャーのあらゆる目的に応用されていることを見出す。ある所では鉱夫が地中の最も深い淵から水を汲み上げるのにそれを採用しており、他の場所では風の不確実さにかかわらず、以前は空想的と思われていた正確さで海洋を越えて我々の荷物を輸送している。我々が飲む水、我々が食べるパン、着る衣服、使う家具、いや我々が読む本や新聞の紙や印刷物は、その多才なパワーの産物のようなものである。

現代の蒸気機関と比較すると、他のすべての発明は重要でないように見える。艤装品を含めた船舶とその遠洋航海で必要とされる知識の拡大は、人類の知的パワーと意欲的な気質との驚くべき例であり、もし船舶の建造と操船の実務に応用する多くの科学について熟考するならば、我々は驚嘆に打たれるに違いない。特に、以前そうであったように、地球のすべての住人をひとつの社会に結びつけ、自然の施し物を一般に広めて、彼らに相互の want を供給できるようにすることにより、この発明から人類が導き出した利益 (advantage) と、それが文明化の状態に影響した進歩 (improvement) とを考えるとき、そうである。

蒸気機関は、自然のパワーを思う方向へ向けて、そのエネルギーを実際の技術的な欲求の満足に用いるという、人類の辛抱強い創意工夫 (ingenuity) の例として、その効用を考えるとき、発明の規模では船に次いでいる。しかし、蒸気機関を天賦の才能 (genius) の産物と考えるとき、それは他のすべての発明の先頭に位置するものであるとされねばならない。

航海の技術は、歴史の最初の期間から今日までのすべての国民の結合した知恵と経験の結果であり、今日の完成した状態に達成させたその後の改良は、ほとんどの場合事故に起因しており、絶え間ない実地経験により改良されてきた。航海用コンパス、火薬、望遠鏡等の最も重要な発明が誰によるものか、我々は知らず、また、人間の弱さと発明の才にとって最も有益なしもべ (の蒸気機関) は、最初は偶然により発明されたのである。しかし蒸気機関は少数の個人の発明であり、最初の起源は哲学的な問いかけの結果であり、非常に発明の才ある (ingenious) 精神の産物であった。そして、その動作原理のほとんどすべての重要な変更は、科学的な知識の応用であった。

(p.4) この 100 年の間にイギリス人により蒸気機関が発明されて広く用いられたという状況から、イギリス国民であればより容易に、この優位を蒸気機関に与えるであろう。特に蒸気機関は、過去 30 年以内に我が国内のすべての製造工場で行われた、それらの大きな改善をもたらす主要な手段の一つであったからである。私達に対して現在の規模にまで商業を拡大することを可能にした、製造業のあの驚くべき増大は、この新しいパワーの助けなしには決してもたらされることはできなかったであろう。実際には、もし、蒸気機関が使用されることがなかったならば、この国は、前世紀の間に富と繁栄を増す代わりに、大きく逆行していたであろうと推測するすべての理由がある。なぜなら、すべての時代にわたってイングランドのの富のかなりの部分を占めてきた、石炭、鉄、銅、鉛、錫の鉱山は、前世紀の初めには、水路や簡単な機械で水を汲み出すのが実用的であった限界の深さまで、ほとんど掘り出して取り尽くしていたからである。そして、蒸気機関の助けがなけれ

ば、燃料、木材、そしてすべての一般の金属は、イングランドではそれ以降長期にわたって非常に不足し、多くの人口の必要量を供給することができなくなっていたであろう。

蒸気機関、または当時の呼び方では火の機関の最初の導入以降の半世紀以上の間では、それは本質的に水力機械であり、そのパワーは水を上げる操作に限られていた。当時それは主に鉱山の排水または町に給水するために適用され、少数の例では、火の機関により上げられた水が、川の自然の落差の代わりに水車を回すために使用された。過去 40 年の間に、蒸気機関は非常に大きく改良され、そのパワーは、人間や動物の力、あるいは風や水の流れなどの自然の力の代わりに、今やあらゆる種類の機械に連続的な回転運動を与えたり、船や馬車を推進するために適用されている。その結果、蒸気機関はアートと工場生産における非常に多様な有用な目的のための、共通の力学的作用因になり、人間の労働の代わりに自力で動く機械によって、全く新しい工場生産システムが生まれた。そのパワーの新しい応用は、絶えず有効に行われており、その活用によって有用なアートがさらにどの程度改善されるかを、予測することは不可能である。

揚水のための古い火の機関は、それなしでは動かなかった鉱山を排水する手段を与えた点で、最も価値のある発明であった。蒸気パワーのその単一の応用は、前世紀の全体の間に、この国へ莫大な富を生み出した。現代の蒸気機関は鉱山の排水用途になおもより効果的であり、工場生産のあらゆる目的にも適用されている。それは、他では知られていないこの国の住民の産業に大きな影響を与え、そしてそのことは、人間の労働に対するこの強力な補助がなければ不可能であったであろう。

(p.5) 企業心に富んだ多くの同胞の手の中にある蒸気機関は、これらの慈善心に富んだ骨の折れる天才の東洋の寓話のいくつかを実現するために作られました、その天才は、何人かの恵まれた人たちの要求で、砂漠の真ん中に人口の多い都市を立ち上げ、地下宮殿を発掘し、噴水や水のカスケードを作り出し、お気に入りを場所から場所へ移動する[*5]。生き生きとした想像力と、それを行使する中で通常詩人に与えられたライセンスの助けとを借りて、私たちの大規模な鉱山や製造工場で、蒸気パワーにより毎日行われている作業は、この素晴らしい発明を知らない人々にとっては、同じくらい信じられなく素晴らしく思える言葉で記述されるかもしれない。120 馬力の力を持つ蒸気機関のいくつかの例があり、これは 1000 人以上の人が同時に行動した強さに等しい[*6]。私達が表現を許されるかもしれないならば、これらの蒸気の巨人のうちの一人は、銅鉱山で深さ

[*5] スコットランドの有能な作家が現代蒸気機関について以下のように話した。「(現代の蒸気機関は) その力と柔軟性の点でも、同様に素晴らしい。それが発揮できる驚異的な力の点でも、その力が変化されて分配、適用される容易さ、正確さおよび柔軟さの点でも同様である。ピンを拾うことができ、オークを引き裂くことができる象の鼻は、それと比べると何でもない。それは封印を刻むことができ、その前の金属の塊をつぶすことができる。また、壊すことなく、ゴッサマー (遊糸) のように細かい糸を引き出したり、そして水の中の泡のように軍艦を推進したりすることができる。それはモスリンを刺繍し、錨を鍛造することができ、鋼をリボン状に切断し、風と波の激怒に対抗して荷を積んだ船を動かすことができる。これらの発明が国に与えた利益の価値を評価することは難しいであろう。それら恩恵を受けていない産業の分野はなく、ほとんどすべての素材において、それらはその使用分野を最も広範に広げただけでなく、その製造量を 100 倍に増大した。ヨーロッパの戦争を戦い、そして最近の途方もないコンテストを通じて、私たちの国の政治的偉大さを高て維持したのは、私達の改良された蒸気機関である。それは、私達に借金の利子を支払うことを可能にし、そして、課税に圧迫されることが少なくなった国の技術と資本を用いて、私達がまだ携わっている根気強い闘争を持続することを可能にするのと同じ偉大なパワーである。しかし、これらはその重要性の点では貧弱で偏狭な見方である。それは人間の快適さと楽しさの量を無限に増やして、世界中に安くて入手できる富と繁栄の材料を提供した。それは手短に言えば、限界を設けることのできないパワーで人間の弱い手を武装させ、物質の最も御し難い性質に対して精神の支配を完了し、後の世代の労働を助けて報いる、将来の力学的パワーの奇跡のための確かな基盤を築いた。この完了すべてが負っているのは、主に一人の人間 (ワット氏) の天賦の才であり、確かに、これまでにそのような贈り物を人類に授けた人はいなかった。祝福は普遍的であるだけでなく、無制限であり、未開の当時代人の感謝の気持ちにより神格化された、鋤と機 (はた) の伝説的な発明者たちは、我々の現在の蒸気機関の発明者よりも重要性の低い利益を人類に与えた。」("Memoirs of Mr. Wait" より)

[*6] 最良の関係筋によると、普通の人の強さは 1 フィート高さへ毎分 3750 ポンドの重さ、つまり 60 立方フィートの水の重さを上げることに等しいと述べられており、人は 1 日に数時間の間、この力を発揮し続けることができる。技術者は、蒸気機関の力を馬力と呼ぶ尺度により評価し、それは、1 フィート高さへ毎分 33000 ポンド、つまり 528 立方フィートの水を上げる力であり、したがって、1 HP は (528 ÷60 =) 8.8 人の力に等しい。この比率によると、114 HP は 1000 人の人間に等しくなる。最も強壮な馬でも、継続的にこのような馬力と公称される力を発揮できるのではない。平均すると、良い馬の強さは 1 フィートの高さへ毎分

1200 フィートのピットの底から鉛直に大量の水を吸い込むために、昼夜休みなく働いているのを見いだされるであろう。そのような機関の代わりに 1000 人の人が雇われたとすると、彼らはその単一の機械と同じ効果を作り出すことはできなかったであろう。確かに、彼らがはしごを登って水をバケツに入れて運び、または他に何の機械の助けも借りずに、そのようなバケツを相互に渡そうとした場合、5000 人の人が同時に行動してもほとんど十分ではないであろう。しかし、1000 人の人がとてもよく訓練されていて、彼らの団結力を適用して機関と同等の優位性を得て、それにより必要量の水を吸い上げることができるとしても、彼らはすぐにその労働により疲れてしまい、彼らを救うために、他の人々が雇われなければならないであろう。そのため、絶え間なく仕事を続けるために、3 組の人々が維持されなければならず、そして時折仕事不能となる人を置き換えて、毎週各人に 1 日の休息を与えるには、少なくとも 500 人以上が必要であろう。このように、私たちには 3500 人の人々が行えるのと同じくらい多くの仕事をし、運転して時々燃料を供給するために二人の人間以外に監督も補助も必要としない、勤勉で疲れない召使いを有しているのである。この記述は、コーンウォールのいくつかの大きな銅山で日々行われている正確な真実である。そこでは、立坑から鉱石を引き上げるための小型機関のほかに、一つの鉱山を排水するために協調して動作している三つおよび四つの大型機関の例がある。

(p.6) 広い製鉄所を訪問すると、同様の機関が動作して、炭鉱および鉄鉱山から水を排出しているのを見るであろう。そして、過剰な熱によって鉄鉱石から鉄を抽出する炉の中へ巨大なふいごで送風するのに、80 または 100 馬力のもう一つの機関が採用されているのを見出すであろう。この機関は他のより寸法の小さい他のいくつかの小さな機関、つまり、10、20、30、および 40 HP に機関に囲まれているのを見いだすであろう。その幾つかの機関は、立坑から石炭および鉱石を引き上げるのに採用され、他の機関は、赤熱の鉄を非常に重いハンマーの急激な打撃で打ちつけるのに採用されている。そのハンマーを持ち上げて一撃を与えるには、20 人の人間を必要としたであろう。そして他の機関は、鉄の棒を長いリボンまたは平らな板に圧延するのに採用されている。それは、ペーストリー (パン菓子) 用の生地がのし棒で伸びるのと同じくらい簡単に見える。

イギリスのすべての大都市では、家庭用水は、20 から 60 馬力の蒸気機関のパワーにより配管を通して配水され、そして、小さな枝管によって配布される。枝管は人体の動脈のように分岐し、あらゆる通りを通って伸びてすべての家に豊富に水を供給する。

現在、多くの蒸気船がイングランドとアメリカの川と海岸を航行し、そのうちのいくつかは 60、80、100、および 120 馬力の蒸気機関を載せて、600 または 800 人、さらには 1000 人の力を合わせたのと同じ程度の力で動作している。これらの機関は、奴隷によって漕がれるどのガレー船よりもはるかに安定して船を推進し、コーチ (四輪大型馬車) が最良の道を走ることができるのと同じくらいの速さで、(風の助けを借りることなく) 水の中を移動する。

6 ないし 8 馬力の小型蒸気機関はまた、馬の代わりに、石炭やその他の重量物の運搬のために、鉄道に載せられたワゴン (荷馬車) を引くのにも適用される。同様の方法でコーチを推進する試みもなされてきて、最近では、蒸気機関車は道路を作るために石を破砕するためにも使われてきた。

我々の人口の多い町には、あらゆるサイズの多くの蒸気機関が、多種多様な目的のために絶えず動作している。水を汲み上げる、とうもろこしをひく、木材や石をひく、丸太を削る、種子から油を搾る、刃物を磨く、鉛や銅をシート状または中空パイプに成形する、毛織物の縮充 (fulling) と磨き (scouring)、ロープやケーブルを撚 (よ) る、ワイヤーを引き抜く、その他のあらゆる種類の面倒な仕事のために。私達は蒸気機関を、すべての大規模な醸造所や蒸留所や、なめし工場、せっけん工場、製鉄所、および造船所や兵器工場の国家機関で

22000 ポンド、または水 352 立方フィートを上げる値であるとすることができる。したがって、1 頭の馬は $\frac{2}{3}$ HP または (352 ÷60 =) 5.866 人の人間に等しいが、馬は 1 日 8 時間しかこの比率で働くことができず、蒸気機関は、それを要求すれば、24 時間すべて動作することができる。

でも見出した、その数は日々増えていて、絶えず新しい目的に適用されている。これらの有用な機関の大規模な製造所が多くあり、そこでは熟練した機械技師の指示のもとに、1 台の蒸気機関が採用され、それらによって駆動される作業機械と同様に、他の蒸気機関を作るというすべての困難で面倒な作業で、労働者を助けている。それらは、この強力な補助により、時計と同じくらい簡単に作られ、そして最高に優美な方法で仕上げられる。それらの部品は、用いられるさまざまな目的に適したさまざまな形に結合され、パワーの点では、それらは 1 人相当から数百人相当のものまで作られている。

多くの単純な作業を行うために、蒸気機関はなおもより広く適用されている。それらの作業は、補助を受けない手の力だけにより簡単に行えるので、一見したところでは、この巨大なパワーの助けを借りようとすることは、不合理に見えるであろう。たとえば、繊細な綿繊維を糸に紡ぐ、それらの糸を布に織る、その後漂白する、洗濯する、染色する、そしてその上にカラーで装飾用数字を印刷する、そして最後に、印刷された布を市場に備えてつや付けし、プレスし、梱包する、等。

(p.7) 上記のパワーは、絹の撚りかけ、亜麻と梳毛糸 (そもうし) を紡いで糸にする、ミシン糸をボールに巻く、等にも適用されている。貨幣を鋳造する、ダイヤモンドをカットする、板ガラスを研削する、眼鏡のガラスを研削する、レースを製作する、書籍および新聞を印刷する、ピンを製作する、カードワイヤーとボタンシャンクを曲げる、帽子を装飾する、職工のリードを作る、かぎたばこの粉挽き、あらゆる種類の薬を粉砕する、香辛料を作る、チョコレートを挽く、トローチ剤を作る、ソーダ水を作る、ソーセージ肉を切り刻む、等々のためにも適用されている。

現代の発明の改良において、羊毛、木綿、梳毛 (そもう)、亜麻、絹のいずれであれ、衣料品のすべての製造において最も些細な操作は、人手を使わずに、水の落下または蒸気機関の力により動かされる奇妙な機械で行われている[*7]。蒸気パワーによる製造所は、燃料を調達できればどんな状況の場所ででも設立できるので、しばしば好まれ、そして、パワーの不足による中断は生じにくい。しかし、水のパワーは特定の状況でしか得ることができず、他の点でもしばしば不利である。水の供給は乾燥した天候による水量不足、霜による完全な停止に左右され、また、雨期の過度の水量のために運転停止となることもある。

蒸気機関はどこでも設置することができ、その後でパワーの増加が望まれるのであれば、他の機関を追加することができるが、水を用いる仕掛けには自然の限界がある。大規模な製造所が長い間水のパワーで設立されてきた、イングランドの多くの地域では、乾期、霜期、洪水時などで、水が機能できない (または部分的にしか機能できない) 時に補助するために、その後の多くの機会で蒸気機関が加えられてきた。前述のように水の自然落下は開けた地方の河川で主に見られるが、蒸気機関車は、労働者が容易に調達できる、人口の多い町の中心部に置くことができる。

蒸気パワーは、それぞれ精密な動作を行う多数の小型機械から成る工場の原動機として、しばしば好まれている。そのような機械では、労働者がその動作を決めるためにかなりの援助を行わねばならず、また、対象とする材料をそれに供給しなければならない。この種類のすべての製造所は多くの労働者を必要とするので、それらは、地方で水力パワーを用いるより、人口の多い町で蒸気パワーを用いる方が、より有利となる。このことは、ロンドン、マンチェスター、リーズ、グラスゴーにおける大規模な製造所の数によって、完全に証明されている[*8]。

[*7] 1818 年にフランス科学アカデミーのビオ氏は、地球の figure を決定するための作業の間に彼が行った航海を語るとき、以下のように述べた。「次に私は、勤勉 (industrious) なイングランドの最も勤勉な地方を訪問した。私はそこで、あらゆる考え得る形の人間の奉仕に用いられる自然の力を見た。そして、人間自身は、一人で指示したり実行できる操作を専ら行っていた。」

[*8] ロンドンには、上水道、小規模製造所、および蒸気船用に約 290 の蒸気機関があり、それらは約 5460 馬力に相当し、継続的に働く 48 000 人の人間の力にほぼ等しい。マンチェスターでは、製造所に約 240 の大型蒸気機関車があり、約 4760 馬力、または 42000 人相当を発揮している。リーズでは、製造所に約 130 台の蒸気機関があり、約 2330 馬力、または 20 500 人相当を発揮

(p.8) 大規模な綿工場は、驚異的な量の軽い簡単な作業を実行するのに、最大のパワーを適用する顕著な例である。100 馬力の蒸気機関は 880 人の人間相当の強さを持ち、50000 本のスピンドルに速い速度を与えて、きめ細かい綿糸を紡ぐ。各スピンドルは別々の糸 (thread) を形成し、全数のスピンドルが巨大な建物の中で一緒に動作している。その建物は機械を設置することを意図して建造されているので、無駄なすき間はなくなっている。これらのスピンドルに加えて、機関は多くの製織準備機 (preparing machine) を動かす。製織準備機は、多くの一連の操作で綿を処理する袋詰めで海外から来た生で汚れた状態の綿毛から始めて、汚れをたたき出し、カーディング (けば立て) つまり繊維を梳いてほぐし、それらがすべてが真っ直ぐにかつ平行になるようにし、そして、スピンドルで糸に捩じられるように長い細かい帯状に引き出される。撚りをかけることは main force の操作ではないが、この場合の機械化の利点は、手作業によるものよりも更に大きい。なぜなら、エリザベス女王の時代に使われていたように、糸巻き棒とスピンドルによって糸が最も簡単な方法で紡がれるのであれば、各人は一度に 1 本の糸しか紡ぐことができない。最も入念で熟達した作業者でも、この機関により回される 1 本のスピンドルで紡げる量の $\frac{1}{4}$ の量も作り出すことができなかったであろう。このような綿工場のすべての作業には、750 人が参加するので十分である。そして蒸気機関の援助により、機械が無ければ 20 万人が紡げるのと同じくらい多くの糸を紡ぐことが可能になるであろう。つまり、一人の人間が 266 人分を紡ぐことができる。機関自体は、それに従事し燃料を供給する 2 人の人間を必要とするだけである。工場の各紡錘は 1 日あたり 2 $\frac{1}{2}$ から 3 かせ (hank) (それぞれ 840 ヤード) を作り出し、これは 12 時間で糸の 1 $\frac{1}{4}$ マイル以上となる。したがって、50000 のスピンドルが毎日 12 時間で 62500 マイルの糸を作り出すであろう。これは、地球上を 2 $\frac{1}{2}$ 周するのに十分な長さを超えている。

イングランド北部では、これよりはるかに大きい規模の綿紡績施設の多くの事例があるが、それらは通常 40、50、60 馬力の二つ以上の蒸気機関を採用している。蒸気動力によって動かされる同じような自動機械のシステムは、羊毛および亜麻の製造工場に引き継がれていて、そしてこれらの施設の多くは、綿工場と同じ規模である。

要約すると、過去 40 年以内の蒸気機関の発明と導入は、火薬と火気の発明が 2 世紀前の戦争のシステムを変えたのと同じくらい完全に、有用なアートのための産業のシステムを変えた。

用語を定義し、いくつかの動作原理を説明した後、本書は三つの部分と付録とに分けられる。第一に、その原理の最初の発見から現在の完成した状態までの、蒸気機関の発明の起源と進歩についての**歴史的説明**。第二に、現在定着している蒸気機関、およびその種々の有用な用途への応用についての、**技術的説明**。第三に、蒸気機関の動作、燃焼と火の性質、熱の性質、および弾性流体中で機械的力を生み出す際のその動作における**原理の理論**。また、付録は speculative であり、または蒸気機関の起源から現在までの、改良のための**プロジェクトの記録**となるであろう。

している。グラスゴーには 80 ないし 90 の蒸気機関がある。バーミンガム、シェフィールド、そして特にランカシャーとヨークシャーのすべての小さな町では、蒸気機関のある工場は非常に多数にのぼり、その多くは大規模である。

2　蒸気とその応用方法について

一般に使用されている蒸気機関の種類は非常に多数であり、それらはその構造と操作の面で大きく異なっているので、はじめてその主題を調べ始める照会者は、その複雑さにより混乱させられるであろう。この研究の導入として、すべての場合に使用されるエージェントである蒸気の性質について、簡単に説明する必要がある。そして、私達が蒸気機関の構造の詳細に入る前に、蒸気機関の各種類の中で、その蒸気の特性がどのように作用しているかを示さなければならない。

(p.9) 蒸気機関のパワーは、他の液体と同じく、水は熱により希薄化、拡張、膨張して、弾性流体つまり蒸気と呼ばれる気体状態となるという、物理的性質から導かれる。冷却、つまりその膨張を引き起こした熱を抽出することにより、凝縮し大量に収縮するのもその弾性蒸気の特性である。これらの性質の結果として、数滴の水が熱によって希薄化されて、かなりの大きさの中空容器を満たすのに十分な体積に膨張して満たすであろう。しかし冷水を当てることにより、または言いかえると、その蒸気から熱を抽出して取り除くことにより、それは急速に凝縮して体積が収縮し、元のものと同じ数滴の水に再び戻るであろう。

蒸気機関は、膨張と凝縮のこれら二つの原理の一つ、または二つの組み合わせからその力を引き出す。蒸気の性質について、およびそれが熱により作り出される方法についての、より正確な考えを持つためには、すべての人が精通しているいくつかの事実を参照することができるであろう。

蒸気の膨張力は、非常に固く取り付けられた蓋と片側から突き出た注ぎ口とを備えた、一般的なやかんで示されるであろう。このやかんに部分的に水が入れられて、底は水で覆われているが、注ぎ口が出て行く部分までは水が上がっていないものとし、それが火の上に置かれて、水が沸騰するまで加熱されるものとする。熱が沸点より少し上まで上げられると、steam と呼ばれる蒸気が注ぎ口の開口から出始めるであろう。そして、さらに多くの熱が加えられると、それは継続的な流れとなって、音を立てて激しく噴出するであろう。この蒸気は、熱によって希薄化されて気体状の弾性流体になった水に過ぎず、十分な熱を伴うとごく少量の水が、そのような大量の蒸気を作り出すであろう。なぜなら、蒸気の噴出する流れは非常に速いにもかかわらず、やかんの中の水は非常にゆっくりと減少し、沸騰して出て行くことがわかるからである。水の量 1 から約 1700 の蒸気量が形成されて、やかんの注ぎ口から噴出すことが、実験によって見出されている。

この蒸気は非常に軽い弾性流体であるので、力を加えることによりやかんの中に、何の閉じ込めもなく保持した時の量の 2 倍から 3 倍の大量の蒸気を保持できるかも知れない。しかし、こうして閉じられた蒸気は非常に熱くなり、それに比例した力をやかんの側面とふたに及ぼして破壊して流出するであろう。このことは、やかんの注ぎ口をコルクで塞いで、蒸気の流出を防ぐことにより示すことができるであろう。もし、加熱を続けたならば、さらに水から蒸気が発生し、しばらくの間やかんの中に溜まる。そこに閉じ込められて、容器の強度で保持できなくなり、蓋を噴き上げるか、注ぎ口からコルクを吹き飛ばすかして、噴き出るであろう。このように閉じ込められた蒸気の力は非常に大きくなり、もし、熱が十分に加えられ、十分に長く続けられたならば、最強の容器をも破裂させるであろう。この効果は、ガラス細工業者により販売されているクラッカーと呼ばれる小さなガラス球により示すことができる。それは中空で、エンドウ豆ほどの大きさで、それぞれに小さな茎があり、少量の水が入れられて出て行かないように密閉されている。これらのクラッカーの一つの茎をろうそくの中にかざして、球を火炎に近づけることにより、含まれている水が加熱されて蒸気に変わり、熱によりその力を増し、ピストルと同じほどの大きな音を立ててガラスが何 100 もの破片に破裂し、普通、ろうそくの芯は破壊されるであろう。

(p.10) 蓄積された蒸気がその閉じ込められた状態から逃れようとする力は、蒸気の膨張力と呼ばれる。こ

の力は、閉じ込められた蒸気が突然入る任意の容器から水を追い出しそして押し上げるために使うことができる。または、その容器がシリンダであれば、容器内非常に正確にはめ合わされてそれを押さない限り蒸気が出て行けなくなった、可動ストッパーつまりピストンを動かすことができるであろう。

弾性蒸気の凝縮は、例えば、その両端にストップコックが取り付けられた小さな樽や桶のような、全周を密閉された中空の容器を使った簡単な実験で簡単に見ることができるであろう。両方のコックを開いて、その一方の注ぎ口を沸騰しているやかんの注ぎ口の中へ入れると、蒸気はそこからの樽の中へ入り、樽の反対側の端にあるコックを通して、含まれていた空気を流して追い出すであろう。そして蒸気がその中を占めて、樽は熱い蒸気で全く満たされるであろう。そして、蒸気は、最初の例でやかんの注ぎ口から流出したのと同じように、他のコックから流れ出すでしょう、これがしばらく続いた後で両方のコックを閉じて、樽を火のそばから遠ざけて温度を下げるか、または樽の外側に冷水を注いで冷却するとする。このようにしてすべての熱が蒸気からでて行くと、膨張を引き起こした原理は無くなり、蒸気は、熱により膨張する前に占めていた同じ体積に、再び収縮する。この体積は蒸気の約 $\frac{1}{1700}$ に過ぎず、したがって、熱い時に樽を全て満たしていた蒸気は、冷たくなると少量の水に凝縮し、樽の残りの容量はほぼ排気された空洞の状態に残される。これは真空と呼ばれ、空気はなく、ごくわずかなごくわずかな蒸気しか含まれていない。この状態では、常に樽の外側を押す周囲の空気は、もはや内側の蒸気による抵抗を受けたりつり合ったりすることはなく、そのため、樽の側面と端面は大気つまり周囲の空気の全圧力を支えなければならない。もし、それらが十分に強くなければ、それらは内側に押しつぶされるであろう。コックの一つを開くと圧力が示され、空気は突然大きな力と速度で樽の中へ突入するであろう。

この力は、さまざまな方法で力学的な目的に適用することができる。蒸気の凝縮により引き起こされる真空を満たそうとする大気の圧力は、いわゆる吸引によって水を 34 フィート以下の高さまで上げることができる。このことは、真空の樽のコックの注ぎ口を、開ける前に水の容器に浸すことにより示される。コックが回されると直ちに、水は、前の例で空気がそうであったのと同じくらいの激しさで、樽に吸い込まれるであろう。ここでもし、水の容器が樽の下 33 フィートの位置に置かれ、樽まで水を運ぶために (すべての部分は気密が維持されていると仮定して)、コックの注ぎ口にその長さの鉛の管がつながれているならば、水はなおも樽の中に吸い込まれるであろう。

キャスクの端に挿入されたシリンダにぴったりとフィットします。空気がそれによって逃げることができないこと、

大気の圧力は、ストッパーや可動ピストンを動かすのに適用することもできる。ピストンは、樽の端に挿入されたシリンダにぴったりとフィットして、空気がそれによって逃げることができなくするか、またはストッパーやピストンをシリンダにいれずに、樽の中へ直接に入れるかする。これは非常に強い力で動作し、力学的な目的に適用することができるであろう。

大気圧の作用は地球の上に載っている空気の重さの結果である。なぜなら、固体物質に比べて空気は非常に軽いにもかかわらず、それは流動的で弾力的な状態の物質であり、そのため、それには大いに知覚できる程の重さがある。大気圧の空気は地球全体を取り囲んでいて、その表面から何マイルもの高さまで広がっている。このすべての空気の重さは地球に載りかかっていて、私たちの手の届くところにあるすべてのものを囲み、他の物質により占められていないすべての空間に広がっている。たとえば、普通の言語では空 (から) と呼ぶ容器は、実際には空気が満たされていて、その空気は、その場所に他のより硬い物質を入れない限り、簡単には取り除くことができない。例えば、その容器に水を注げばそれは空気を追い出すであろう。この周囲を取り巻く空気は、それが触れるあらゆるものを大きな力で、上下左右あらゆる方向へ等しく押し付ける。

(p.11) 力学的手段によって中空の容器から空気を抜き取り、それを空のままにすることができる。しかし、

そのような排気状態を引き起こすためには、かなりの力を必要とする。このことは、瓶に口を当ててそこから空気の一部を吸い出すことにより、ある程度経験することができる。唇を外すとその中へ空気が、排気した空間を埋めるために激しく音を立てて戻っていくであろう。ポンプを用いると、より完全に閉じた容器の中から空気を排出し、その中に真空を作ることができる。空気の一部が抽出されるとすぐに、外部の空気が容器の外面を強く押し付け始めるように見え、容器内へ入ろうとする。実際、容器が空気で満たされていた間でも、外気は等しい力で押していたはずであるが、その時、容器の内部に含まれていた空気の圧力つまり弾性力はその外面に働く外部の空気の圧力に等しく、両者の反対向きの圧力は互いにつり合っていた。内部の空気が完全にまたは部分的に取り除かれると、外面の圧力はもはやつり合わなくなり、容器を内側へ押し潰して、何もない空間を埋めようとする。

この圧力が作用する重さは、気圧計で示されるように、天候により多少異なる。しかし平均すると、表面の 1 平方インチあたり 14 $\frac{3}{4}$ ポンド (常衡) とすることができる。これを説明すると：中空の容器の上面に 1 平方インチ近くの穴があり、この穴はちょうど 1 平方インチの柔らかい濡れた革で覆われているとする。また、同じ大きさの金属の薄い平らな板が革の上に置かれるものとする。前述のように、ポンプまたは蒸気を凝縮させることにより、容器から空気が完全に排出されて、その中が完全に真空になったとすると、そのとき、外部の空気は板を 14 $\frac{3}{4}$ ポンドの力で押し下げるであろう。なぜなら、1 インチ角で地表垂直上向きに数マイルの空気の柱の重さはその値であり、それは板により支えられなければならないからであり、それを支えるためにプレートの下に何もないからである。空気が容器内に自由に入ることができるときは、外の空気が板の上面を下に押すのと同じ強さで、内部の空気が板の下の部分を上へ押し、これらの対抗する圧力は互いにつり合っているので、板は自重によってのみ支えられている。

地球の表面の上の大気の重さつまり圧力は、それを 33 $\frac{3}{4}$ フィートの厚さの水の層で覆うことにより引き起こされる圧力にほぼ等しい。または、30 インチ厚さの水銀の層も同じ力で押すであろう。

大気について、地球の表面から何マイルもの高さに広がっているとして話す際に、地球の表面より上に位置するのに比例して、所定量の空気は、より軽く希薄に薄くなることが考慮されなければならない。なぜなら、地球の近くの空気は、その上にあるすべての空気の重さで押されているからであり、弾性があり圧縮性がある流体であるので、その下部領域は、より上部領域のすべての重みで圧縮されてより少ないスペースに押し込まれ、下部領域では上の地域よりもより密度が大きく、より重くなるであろうからである。

空気の実際の重さは天候によって変わるが、平均値として、気圧計が 30 インチを示し、華氏温度計が 60 度を示す乾燥した天候では、地表の空気は同体積の水より 830 倍軽いとすることができる。今、水の 1 立方フィートの重さは 62 $\frac{1}{2}$ ポンドつまり 1000 オンス (常衡) または 437500 グレーンであるので、1 立方フィートの空気の重さは 1 $\frac{1}{5}$ オンス (常衡) または 527 グレーンであり、100 立方インチが 30 $\frac{1}{2}$ グレーンとなる[*9]。

(p.12) 蒸気の性質と物性の主題については、その適切な場所で再度取り上げて、より完全に扱われるであろう。ここでは、その主な事実を列挙して、それぞれの種類の蒸気機関の動作が、その列挙した蒸気の性質からどのように生み出されるのかについて述べる。

最初の蒸気機関車は、1663 年に**ウスター侯爵**により発明された。それは蒸気の膨張力だけにより作動し、ジェットまたは噴水で水を押し上げるものであった。それは使われることはなかった。

次の発明者はキャプテン・セイヴァリであり、彼は 1699 年に、火により揚水するための機関を製造した。それは蒸気の膨張と凝縮の両方により動作し、その二つの原理が交互に用いられている。空気の圧力が、凝縮によって得られた真空の空間に水を押し上げた。これは価値ある発明であり、より完全な機関が登場するまで

[*9] (訳注) 1 ポンド (常衡) = 0.45359237 　= 16 オンス = 7000 グレーン

使われた。

3 番目の機関は、それを最初に考えて実際に 1710 年頃に機関を発明した、ニューコメン氏にちなんで呼ばれている。そのような機関の最初のアイデアとその動作原理は、その数年前にパパン氏によって与えられていた。それは、蒸気の膨張力を用いずに大気の圧力により動作するため、大気機関とも呼ばれる。蒸気は中空のシリンダを満たして、そこから空気を追い出すためだけに使われるのである。この蒸気は、冷水を投入することにより冷却凝縮され、シリンダ内に真空が作り出され、そして、大気の圧力がピストンつまりプラグを動かす。ピストンはシリンダ内で自由に動くことができる程度に正確にそこへはめ込まれていて、空気は、ピストンを押すことなくシリンダ内へ入ることはできない。ニューコメン機関は、ポンプにより揚水するために非常に広範に使用され、半世紀の間、彼の発明は貴重な鉱山を排水することにより、この国にとって大きな富の源であった。それはまた、町に水を供給するためにも使われ、現在も、連続的な円運動を行う機械を回転するために使用されている。(ニューコメン機関では、) 大気が可動ピストンに及ぼすその力が、レバー、クランクおよびはずみ車によって他の機械に伝達されるが、それ以前の機関は、水を上げるためだけに用いられていた。ニューコメン機関は、より改良された蒸気機関により取って代わられたが、まだ使用されている。

現代の蒸気機関は 1769 年にワット氏により発明された。それは蒸気の膨張力により、またその凝縮により動作し、シリンダ内で動けるピストンに運動を与えるために、両方の原則が同時に用いられている。真空は最初、蒸気の凝縮により得られるが、大気圧の空気でピストンの上に押し付けて動きを与えるのではなく、弾性蒸気がピストンに作用するようにされている。したがって、それは実際に蒸気により動かされる機関である。凝縮もシリンダとは別の容器でニューコメン機関よりも完全な方法で行われ、より大きな効果が得られる。ワット氏は蒸気機関車を 1775 年頃に完成させ、彼以前の発明者たちよりはるかに少ない燃料消費で動作させた。最初、彼はそれをポンプで揚水するためだけに使用したが、その後の一連の発明により、彼はピストンの運動を連続的な円運動を作り出すのに適用し、それにより、製造のあらゆる目的に彼の機関を使用できるようにした。彼は 1784 年にこのすばらしい発明を完成させ、それ以来、この国では膨大な数の蒸気工場 (蒸気機関で駆動される工場) が設立され、その使用は毎日、世界中の至る所へ広がっている。

近年、**高圧蒸気機関**が使われ始めている。この種の機関は、可動ピストンを押す非常に熱くて非常に弾性のある蒸気の膨張力により動作し、その蒸気は真空を作り出すために凝縮することはなく、その役割を果たした後、外気中へ放出される。それらの機関は 1806 年にトレヴィシック氏により最初に作られたが、その機関の原理は前世紀の初めに提案されていた。高圧機関は単純であり、特定の目的には非常に便利であるが、ボイラは閉じ込められた蒸気の力により爆発しやすくなり、一般にそれらはワット氏の機関ほどうまく動作しないことがわかっている。高圧機関はアメリカのいくつかの地域、特に蒸気船の場合に高い評価を受けていて、それらはオリバー・エヴァンス (Oliver Evans) 氏によりその国に導入された。

(p.13) 最後のそして最も改良された蒸気機関は、1805 年にウルフ (Woolf) 氏により発明され、その後、彼により非常に広範囲に使用されてきた。それも高圧蒸気機関であるが、可動ピストンに力を及ぼした後の高圧蒸気は、再度使用されてより大きい第 2 のピストンに作用し、その後、ワット氏の機関と同じく真空を得るために凝縮される。蒸気のこの二重の使用により、他のどの機関よりもはるかに少ない燃料消費量でパワーが得られるので、その改善は非常に重要である。

最初の 3 人の発明者、ウースター侯爵、セイヴァリおよびニューコメンは、この素晴らしい機械に大きな力を与えることに成功し、機関はそれ自身で、大きな抵抗を克服することができた。しかし、それは現代の機関を特徴付けている動作の活発さと敏速さに欠けていて、そのパワーは、その運転員の制御下にあって、それほど大きくはなく、また、多量の燃料を必要とした。ワット氏と現代の改良者たちはこれらの欠点を取り除き、そして、彼らがその力を実際に増強すると同時に、それを非常に速い動作が可能なものにして、その力を完全

に制御できるものにしたので、今ではそれは、われわれが採用することのできる、もっとも活発でかつ扱いやすい労働者となっている。

これらの発明者たちやその他の多くの人々は、彼らの働きにより人類に大きな利益を与え、彼らの革新的な発見の歴史は私達の注目に値する。それ故、我々は蒸気機関の発明について詳細に説明しよう。才能ある機械技術者の頭を占めた、すべての投機的プロジェクトに参入することを意図するものではなく、そのような発明は、重要な改善への道を導いたそれらの哲学的発見と力学的プロジェクトの occasional notice と共に、実用化されたものであることを示すためだけである。力学的論考で使用される用語が、まず定義されなければならず、そしていくつかの確立された動作原理が述べられなければならない。

3　力学的原理の定義

3.1　物質

物質 (matter) は、自然のすべてのものが構成されるその物質の総称であり、その最も重要な力学的性質は、1. 拡張、つまり空間を占有する性質。2. 重さ、つまり地球に引き寄せられる性質。および 3. 慣性、つまり運動または静止に関して現在の状態を維持しようとする性質。

物体 (body) は物質のある集合量であり、空間のある有限の部分を占めて、それによりある形状 (form, figure, or shape) となって存在する。物体は固体、流体、または空気状 (aeriform) の状態のいずれかとなる。

質量 (mass) は、ある決まった量の物質を含む物体であるが、拡張つまりそれが占有する空間は無視される。

体積 (volume) は物体の広がりの尺度であり、つまり、それが占める空間部分である。容量 (capacity) も空間のある決まった部分であるが、その空間に含まれる物質は考慮しない。体積と容量は、長さ、幅、厚さの三つの次元を組み合わせて決定する必要があり、したがって、長さ 1 フィート、幅 1 フィート、厚さ 1 フィートの空間は、1 立方フィートと呼ばれ、容量の尺度として使用することができる。つまり、ある量の鋳鉄、水、あるいは空気の体積は 1 立方フィートに等しい、また、ある容器の容量または固形含量は 1 立方フィートに等しい、ということができる。

(p.14) **重さ (weight)** は、地球がその中心に向かってすべての物体を引き寄せる重力の、継続的な引力の結果である。二つの物体が正確に同じ長さのアームの天秤の両端でお互いにつり合う時のように、それらが同じ状況でまったく同じ効果を生み出すとき、我々は二つの重さは等しいと結論する。任意の物体の**質量**つまり物質の量は、常にその重さにより推定される。なぜなら、もし地球が二つの物体を等しい力で引き付けるのであれば、それらは等しい質量つまり物質の量を含むと仮定される。たとえば、62 $\frac{1}{2}$ ポンドの鋳鉄、62 $\frac{1}{2}$ ポンドの水、または 62 $\frac{1}{2}$ ポンドの空気は、等しい物質の量であると考えられる。

密度 (density) は、同じ体積を持つ異なる物体に含まれる物質の相対的な量を表す比較の用語である。たとえば、1 立方フィートの鋳鉄の重さは 450 ポンドであり、1 立方フィートの重さは 62 $\frac{1}{2}$ ポンドである。したがって、鋳鉄の密度は水の密度の 7.2 倍である。

レアリティ (rarity) は密度の逆数であり、したがって、水のレアリティは鋳鉄のそれの 7.2 倍である。

任意の物質の**比重 (specific gravity)** は、水の密度と比較した密度、つまり、同体積の水の重さと比較したその任意物質の重さである。したがって、鋳鉄の比重は 7.2 であり、水のそれは 1 である。空気状物体の比重は、通常水ではなく空気と比較して述べられる。

物体のいくつかの部分が他のあらゆる部分と類似であることがわかったとき、それらの部分の重さ (密度) は同じであると結論づけても安全であろう。そのような物体は**均質**である、または一様な密度であると言われ、それらの重さはその体積に比例する。したがって、ある均質物質の一定体積 (例えば 1 立方フィートの水) の重さを標準値として割り当てることにより、その体積の倍数と約数をとることができ、そのようにして、計量作業を継続的に繰り返すことなく、それらの体積から水のすべての質量を簡単に求めることができる。同様にして、他の任意の物質の質量も (その密度または比重がわかっているとして)、それらの体積を既知質量の水の体積と比較することにより、決定することができる。

3.2　運動

運動 (motion) は時間と場所の概念を含む複合的な概念である。動いている物体は、それを比較する他の物体に対して、その場所つまり位置を変える動作を行っている表現することができる。

場所 (place) は、他の物体から見た物体が占める空間の部分である。空間の一部として場所を特定できる唯一の方法は、その隣接する他の部分を占めるいくらかの物体を参照することによるものである。

時間 (time) は、物体のある定まった運動の間に生じる、事象の期間または存在の一部、あるいは継続の一部である。私達は時間の部分の概念を、運動により示されるものとして、または、空間の異なる部分を連続的に通過する物体の運動

として、最もよく把握することができる。かくして、時間の標準的な尺度は天体の運動であり、そこでは、地球が太陽の回りを一周する期間が年を決定し、地球のまわりの月の周回が月の尺度となり、そして自身の軸を中心とした地球の自転が日を表している。そして、振り子と時計の動きにより、日は人為的に時間、分、秒に分けられる。

速度 (velocity) は、運動の速さつまり敏速さを表す表示、つまり、物体が一定の時間内に通過する運動の広がりつまり距離である。ある物体が運動する割合が常に同じであるとき、または、それが連続する等時間間隔ごとに等しい距離を通過するとき、その物体は**等速 (uniform velocity)** で動くと言われる。運動の速さが絶えず増加して、すべての連続する等時間間隔で、物体がより大きな距離を動くとき、物体は**加速度 (accelerated velocity)** を伴って動くと言われる、**減速度 (retarded velocity)** は加速速度の逆であり、通過する距離は、それぞれの連続する等等間隔でより小さくなる。

速度の尺度 (measure of velocity) は、物体が決まった時間内に一様に動く間隔または距離であり、したがって、我々はコーチまたは蒸気船が毎時 10 マイルの速度で移動する、または毎分 880 フィートまたは毎秒 14 $\frac{2}{3}$ フィートの速度で移動すると言い、これらはすべて同じ速度に対する表現の異なる用語である。速度が変化する場合では、速度の増減率を表現する必要がある。連続する等時間間隔で速度の増減量が同じ場合、これは一様加速度、または一様減速度と言われる。たとえば、重力によって自由に落下する物体の運動は、それは、すべての連続する $\frac{1}{4}$ 秒間で、8 $\frac{1}{24}$ フィートの割合で増加するので、一様に加速され、$\frac{1}{2}$ 秒間落下したとき、毎秒 16 $\frac{1}{12}$ フィートの速度になっている。それが $\frac{3}{4}$ 秒間落下したときには毎秒 24 $\frac{1}{8}$ フィートとなり、1 秒間落下したときには毎秒 32 $\frac{1}{6}$ フィートとなり、以下同様に、それに続く各 $\frac{1}{4}$ 秒間の終わりには、8 $\frac{1}{24}$ フィートづつ速度が増加する。

3.3 アイザック・ニュートン卿により確立された三つの力学的公理つまり運動の法則

I. 慣性の法則：すべての物体は、何らかの力の行使によりその状態が変えられるまで、静止状態または直線上の一様運動状態を続ける。

II. 外力の法則：物体の静止または運動に影響を与えるあらゆる変化は、外力の方向を向き、そして静止や運動の変化はその力に比例する。

III. 反作用の法則：反作用はすべての場合において作用に等しく、反対向きである。互いに接する二つの物体の相互作用は常に等しく、それらは反対の方向に作用するからである。

3.4 慣性 (inertia)

(p.15) 慣性は物質に固有の性質であり、それによって物体は、現在の静止または一様運動の状態を継続しようとし、その状態のいかなる変化にも抵抗する。このようにして、静止している物体は、それを動かすためには力を加える必要があり、一定速度で動いている物体は、それをより大きいまたは小さな速度を与えるには、力の加える必要がある。

以前は "慣性力 (vis inertiæ)" という用語が使用されていたが、慣性は力ではない。なぜなら、物質に内在する活力 (active power) は存在せず、それは絶対に受動的であり、運動や静止には無関係であるからである。それゆえ、最大の物体は最小の力の作用により動かされる。

3.5 力 (force)

力は、静止した物体に運動を引き起こしたり、動いている物体の運動を増加、減少または変更することができる、任意の作用または原因である。ある物体を静止状態から動かしたり、その運動の方向または速度に変化をもたらすのは、その物体に他の物体が (力を) 及ぼした結果である。

物体に働く力は、反対方向へ作用する他の同等な力により相殺されるので、競合する力は互いを打ち消し合い、そのとき、物体の静止状態が乱されることはない。そのような状況の力は、**静止力または圧力 (quiescent force or pressure)** と呼ばれ[*10]、物体に運動を与える力は、**推進力または駆動力** と呼ばれる。

力の詳細な性質は、その効果だけで調べることができ、それらはその原因に関係なく、物体に効果を生み出すことができる。私たちは、静止力または静止圧力について、それが相殺されていない場合に物体に作用することで生じる、運動または運動の変化を考える以外には、どのような概念も形成することはできない。

運動している物体に連続的に働く任意の力の作用によりその物体が動かされるとき、それは物体に均一な加速度運動を与える。落下物体に働く重力はそのような例である。物体の運動を一様に継続するためには、物体を動かすために伝えられた力以降の、力の作用は必要とされない。最初の推進力が作用するのをやめたときや、または、作用し続けている推進力と同じ強さで反対向きの、他のある力が作動するようになったときは、物体は一様に動く。作用力と反作用力がお互いに打消し合うと、物体に影響を与えなくなり、物体はその後、自身の慣性によりその一様な運動を続ける。

3.6 平衡

平衡とは、同時に作用する二つの力の間で、大きさが等しく反対向きに作用する状態であり、それにより、お互いに対抗して打ち消し合い、それらが作用する物体の静止状態または運動に影響を与えることはない。平衡は、2 種類に区別することができる。それは、静的平衡と呼ばれる静止物体の平衡と、動的平衡と呼ばれる一様に運動する物体の平衡である。

静的平衡は、物体が静止している時に、それに作用する全ての対抗する力の平等である。ある物体が、相異なる互いに等しい力で反対方向へ押されているならば、それはどちらの方向へも動こうとはしないであろう。秤のはりに均等に荷重がかけられた時、そのはりはそのような状態である。また、このような動きを生じさせようとするいくつかの力が加えられて、固形物体が形状変化に対抗する抵抗、つまり**受動抵抗または物体の強度**により静止状態に保持されている物体の状態は、このような状態である。

動的平衡は、運動している物体に作用するすべての推進力と抵抗力とが等しいことであり、そのため、物体は自分の慣性により一様な速度を維持し、推進力が優って加速されることも、反対方向の力が過剰となって減速することもないであろう。このような動的平衡の状態からは、一様な運動のみが生じることができる。

3.7 圧力

圧力つまり静止力は、同等の反作用力によるか、または、それが接触している他の物体の受動的抵抗によるかにより、運動していない物体に作用して、移動させるための継続的努力を発揮する任意の力である。

(p.16) **静止力つまり圧力の尺度：**重力は、それを用いて他の全ての力を比較し、それらの比を数値で表すための、基準として用いられる。物体に動作して動かそうとする推進力を測定するには、その力に対抗して動きを止めるために、反対方向に重力が加えられなければならない。そのとき、その重さが問題の力つまり圧力の測定値となる。任意の重い物体をつり合わせて秤量することにより、受動的力で物体の運動を止めている支持部に作用する圧力を求めるのである。

密閉容器に閉じ込められた弾性蒸気による圧力は、容器の穴の上に緩いカバーを用いて、それを押して蒸気を逃げないように押し留めるだけの重さの重りをカバーの上に負荷することにより、測定することができる。緩いカバーの上方の大気による圧力にその重りの重さを加えたもの (p.11 を参照) が、閉じ込められた蒸気が容器の内部表面に及ぼす圧力を表す。

この測定作業では、力を測定する重さの単位として、一般にポンド (常衡) が使用され、ある場合には、1 立方フィートの水 (62 $\frac{1}{2}$ ポンド) が用いられる。

[*10] (訳注) 圧力とは、静止した物体に働く力と考えられていたようである。

3.8　力学的パワー

力学的パワーまたは単にパワーは、物体に働く推進力の有効な作用により物体に伝えられる、強制力による運動の量の表示式であり、物体に及ぼされる力と、その作用により生み出される運動との合成物である。

一つの力で駆動され、同時に同じ大きさの抵抗力により反対方向へ押される運動物体は、それ自身の慣性により、当初与えられた速度で一様に動き続けるであろう。なぜなら、物体に及ぼされるすべての推進力は、抵抗力に打ち勝つ中で無力化され、消費されるからである。これが動的平衡の状態である。

物体を押す推進力が抵抗力を超えるときはいつでも、その運動は加速するであろう。あるいは、抵抗力が推進力を超える場合は、その運動は減速するであろう。しかし、運動が一様であり続ける限り、推進力と抵抗力は互いに正確に等しくなければならない。一様運動を行っている状況は、加速または減速運動を引き起こす状況とは、慎重に区別されなければならない。

力学的パワーつまり強制力による運動の尺度 は、推進力に力が作用する距離を乗じて得られる積である。または、抵抗力にそれが作用する距離をかけた積も、同じ結果を与えるであろう。推進力をポンドで見積もり、それが作用する距離をフィートで見積もるのが最も便利である。

例：馬がプーリに通されたロープを引いて、深さ 137 $\frac{1}{2}$ フィートの井戸の中で、のバケット一杯の水の重さ 80 ポンドを引き上げるとする。バケツを引き上げるためになされる力学的パワーは、(80 ポンド ×137.5 フィート ＝) 11000 ポンド フィートと表すことができる。または、もしバケットの重さが 110 ポンドであり、200 フィート上げられたとすると、力学的パワーは、(110 ポンド ×200 フィート ＝) 22000 ポンド フィートとなっていたであろう。それは、前の例でなされるパワーの 2 倍である。プーリとそれに沿うロープの曲がりによる摩擦は、馬が打ち勝たねばならない抵抗を、単なる重さを超えて増やそうとする。

シリンダにはめ込まれた可動ピストンに対して作用するとき、空気または蒸気により発揮される力学的パワーは、その動きを止めるようなつり合い重りをピストンに加えることにより決定することができるであろう。そして、運動中に及ぼされる力学的パワーは、等しい重さにピストンが動く距離を掛けた積で表されるであろう。

例：ピストンは直径 28 インチ、長さ 6 フィートのシリンダに取り付けられて、いるとします。その内部を蒸気で満たした後、その蒸気を冷水で凝縮することにより排気する (p.10 参照) とすると、外部の空気がピストンを押し、それを排気されたシリンダ内へ押し込むであろう。ピストンに対する圧力が 44000 ポンドで、それが 5 フィート動くとすると、その場合、なされる力学的パワーは (44000 ポンド ×5 フィート =) 22 000 ポンド フィートとなるであろう。**注意：**動作中にピストンに対する圧力が変化するのであれば、その変動の平均をとる必要がある。

力学的パワーは、加えられた力に、所与時間内に移動した距離を掛けた積により推定されるであろうが、この表現は一様な運動の場合に限定されなければならない。力が作用する距離を表すためにその速度が採用されるときを除いて、その作用に費やされる時間は、力学的パワー量を決定するために必ずしも特別なものではない。たとえば、馬、または蒸気機関のピストンが 22 000 ポンド フィートのパワーを発揮するとき、それが 1 分以内、または 5 秒以内、あるいはその他の時間内に行われたかどうかによらず、そのパワーは同じになる。

発揮される力学的パワーを考えるには、所定の重り (ポンド) が降下する鉛直高さ (フィート) として推定するか、または抵抗に打ち勝つと考えて、その重りが引き上げられる高さとして推定するのが最良である。なぜなら、下降または上昇が低速で一様な速度で行われる限り、鉛直方向の重力はある定まった力となるからである。しかし、力学的パワーの定義で述べたように、動いている物体により発揮される力学的パワーは、反対方向へ作用する力に対抗してその運動が生み出されている限り、それが鉛直方向と水平方向のいずれの距離を移動するかに依らず、同じ値となる。運動が一様であることは、そのような反対方向の力は力学的パワーと正確に等しい (すべての外力がつり合っている) こと、または、運動の原因である駆動力 (motive force) とその運動の結果である抵抗力とが互いに一様な関係にあること、の証明である。これは動的平衡の状態である。しかし、それらの間の関係が変わるときはいつでも可変速運動となる。

(p.17) 何らかの感知できる速度変化が起こると、運動の変化に抵抗する物体の慣性作用が考慮されなければならない。なぜなら、原因として考えるか、結果として考えるかに依らず、力学的パワーは常にそのような変化に関係しているからである。物体を動かすまたは加速するために物体に伝えられるパワーは、物体の「エネルギー」と呼ばれる。あるいは、物体の動きが止められるか妨げられたりするとき、物体はそのパワーを復元し、そのパワーは「勢い (impetus)」と呼ばれる。

可変速運動のすべての場合において、動いている物質のエネルギーや勢いが考慮されなければならない。しかし、通常

は、我々は移動距離を速度により観測しているが、観察する時間間隔の間に、移動する物体が実際に描く距離を用いることにより、発揮される力学的パワーを測定することができるであろう。

例：88 立方フィートの水 (質量は 5500 ポンド) が等加速度運動で動き、観察期間の開始時に毎分 40 フィートの速度であり、1 分後の観測終了時に毎分 80 フィートの速度であるとする。ここで、その間の通過距離は 60 フィートになるであろう。なぜなら、加速がなければ通過距離は 40 フィートであったであろうし、これに速度増加の半分を追加する必要があるからである。したがって、その間に実際に発揮された力学的パワーは、(5500 ×60 =) 330000 ポンド フィートである。

注意：このパワーにより生み出される力学的効果を測定することにより、打ち勝つべき抵抗は 330 000 より小さいと思われるかも知れない。なぜなら、発揮されたパワーの一部は抵抗を克服するのに費やされるのではなく、動いている質量に伝達されて、その速度を毎分 40 フィートから毎分 80 フィートへ増加させるからである。そのように伝えられるパワーは、別の項目の中で述べられるであろう。

3.9 運動する物体のエネルギー

動いている物体のエネルギーは、物質の慣性に対抗して静止状態からそれに運動を引き起こすために、その物体へ伝達される力学的パワーである。そのように伝えられたパワーは、物体がその運動を減らさずに維持する限り、そのように動いている物体内に存在し続け、物体のエネルギーまたは固有の力 (inherent force) と呼ばれるものを構成する。

物体が等速で動いている場合には、エネルギーは活動的な力にはなり得ない。なぜなら、変化がないところでは、固有の力またはエネルギーは、その運動を継続する以外に他の動作を行えないからである。当初物体に伝達されてその運動を引き起こした力学的なパワーは、速度が一様である限り、何の効果も生み出さず何の減少も受けないので、その物体内に潜伏状態または不活性状態で存在している。しかし、その潜在的な力は常に行動を起こす用意ができていて、速度の減少を引き起こすようなどんな障害に対しても、力学的パワーを発揮する。動いている物体からそのように引き出されて活性化されたパワーは、その「勢い (impetus)」と呼ばれている。

エネルギーの尺度は、移動する物質の重さまたは質量に動く速さの 2 乗を掛けたものである*11。この積は運動する物体に蓄積された力学的パワーを表し、物体が持つ運動を生み出すために、最初にそれに伝達されたものである。したがって、エネルギーは運動する質量に存在する全パワーを表わすが、しかし、すべての動きを止めて静止させることにより、それは活性化できるだけである。一様な速度の場合、この力はまったく潜在的または不活性である。なぜなら、物体の勢いが何らかの作用を及ぼす、または、物質内の慣性の性質が力と何らかの関係があるといえるのは、速度に何らかの変化が生じる時だけであるからである。

注意：エネルギーを計算するには、速度が一様かどうかによらず、物体が実際に動いている最後に得られた速度を取らなければならない。なぜなら、物体は静止状態から加速が終了して一様な速度を取得するまで、必然的に加速されて動かなければならないが、等速運動が継続している間は、その運動を続けるのにそれ以上の力は必要ないからである。

例：毎秒 40 フィートの速度で動く鋳鉄の 1 立方フィートの物体のエネルギーは、1 立方フィート ×(40 ×40 =) 1600 = 1600 と表すことができる。これは別の質量 4 立方フィートの鋳鉄が毎秒 20 フィートの速度で動くエネルギーに等しい。4 立方フィート ×(20 ×20 =) 400 = 1600 。両物体のいずれの運動も、同じ障害または抵抗により消滅されて、静止するであろう。

(p.18) この種のすべての比率は、計算尺で通常 C および D と印されている目盛り尺を用いて、最も容易に求めることができる*12。C 尺上に質量を表す数を見つけ、その数値が D 尺の 1 の対抗位置に来るように C 尺を動かす。このように計算尺を設定し、その質量の任意の速度を D 尺上の数値により表すと、C 尺上の対応する数値が、その速度で移動する質量のエネルギーを表す*13。

---

*11 (訳注) この表示には係数の $\frac{1}{2}$ がない。Euler も当初はこのような表示を用いていて、これは質量の定義に関係しているとされている。

*12 計算尺は普通の計算の実行に非常に広範囲に使用される手段であり、すべての技術者と機械技師はその実際の使用に精通しているべきである。計算尺の使用法の簡単な説明は、これらの定義の最後にある。

*13 (訳注) この当時の計算尺はワットが開発したものであり、D 尺は 1 〜 10 の対数目盛り、C 尺は 1 〜 100 の対数目盛り (現代の B 尺に同じ) となっている。

計算尺				例			
	C	運動質量	エネルギー		C	4.0 (ft^3)	1600 (エネルギー)
	D	1.0	速度		D	1.0	20 (ft/s)

したがって、エネルギーは運動する質量に存在する全パワーを表わすが、しかし、すべての動きを止めて静止させることにより、それは活性化できるだけである。一様な速度の場合、この力はまったく潜在的または不活性である。なぜなら、物体の勢いが何らかの作用を及ぼす、または、物質内の慣性の性質が力と何らかの関係があるといえるのは、速度に何らかの変化が生じる時だけであるからである。

力学的パワーの尺度とエネルギーの尺度の区別：抵抗力にうち勝つのに費やされる力学的パワーの量と、動いている質量のエネルギーを構成する力学的パワーとは、運動速度との関係で非常に異なっている。なぜなら、動いている物体により及ぼされる力学的パワーは、単なる速度により測定されるのに対して、そのエネルギー (それもまた力学的パワーである) はその速度の 2 乗で測定されるからである。したがって、これら二つの異なる尺度が用いられる両者を、明確に区別することが必要である。

すべての場合で我々が力学的パワーとして参照しなければならない尺度は、質量 (に比例する力) にそれが通過した距離を乗じた量である。したがって、それは時間と直接の関係は持たないが、通常我々は、便宜的に運動の速度から通過距離を推測する。ここで、いくつかの場合では速度は力学的パワーが消費される割合を示すのに対して、他の場合では、速度は運動する物体に蓄積されて必要なときに使うことができるパワーを示す。

運動が一様であることは、実際にはそのパワーは消費されていて、蓄積されていないことの確かな証拠である。なぜなら、蓄積が起こるときはいつでも速度はかならず増加しなければならないからである。一様な運動では通過する距離は速度に比例するので、もし質量にその一様速度を掛ければ、通過した距離に質量を掛けた場合と同じ結果が得られる。しかし、実際に必要とされる量は後者の通過距離であることを、常に見ておかねばならない。

一様な運動のこれらの性質から、一様速度となるすべての場合において、質量に単に速度を掛けたものは、絶えず続く抵抗に対抗して一様な速度を維持するために一様に発揮されて消費される力学的パワーの大きさを表していることは確かであろう[*14]。

運動している物体のエネルギーは、もともとその最初の静止状態から、物質の慣性という性質に対抗して現在に運動状態へ変化させるために、物体に伝達された力学的パワーである。このように伝達されたすべてのパワーは、動いている物体内に蓄積され、物体が一様に動き続ける限りそれは不活性であるが、運動が減少して物体が一様運動状態から静止状態に戻るにつれて、それは正確に再現されて出て来るにちがいない。こうして蓄積されたパワーを測るには、動いている質量に、パワーが実際に伝達される間に移動する距離を掛ける必要がある。

簡単には、通常、その質量が得た最高速度を観察し、そこからそれが通過する距離を求めるには、その速度を 2 乗しなければならない。なぜなら、その質量が問題の距離を通過するとき加速度運動しており、静止状態から加速されで通過する距離は、その加速により得られた速度の 2 乗であることを知っているからである。我々が最終の速度を実際に観察する時、それは一様となっているかも知れず、普通はそうなっているであろう。しかし、物体に実際に含まれている量は、実際に静止状態から運動を生じていた時に動く質量が通過した距離である。それは、最初の静止状態から我々が観測したその一様な運動状態となるまで、加速運動 (等加速度運動) で動いた距離でなければならない。

得られた速度は、加速運動があったという確かな証拠であり、そしてそれを作り出すのに伝えられた力学的パワーは、取得された速度の 2 乗になっているはずである。

慣性と加速度のこれらの特性から、質量に最終速度の 2 乗を掛けたものは、その物体の慣性に対抗して静止状態から運動状態へ動かすためにその最初の段階で伝えられた力学的パワーの量を表すであろうことは確かである。

(p.19) 従って、パワーの消費または蓄積における二つの場合は、その運動の性質により常に区別できるかもしれない。一様な速度で動く物体の中では、それに伝えられる力学的パワーは消費されなければならず、それは速度そのものに比例している。そして、速度が加速されるときは、動いている物体に伝えられる力学的パワーはその物体に蓄積され、その値は最後に得た速度の 2 乗に比例する。

すでに述べたように、蒸気または弾性流体によるなされる力学的パワーは、圧力に等しい重量に、圧力が作用する距離を掛けて測定される。しかし、弾性流体を動かすためにそれに伝えられるエネルギーつまりパワーを測るためには、その流体に含まれる物質の実際の重さを考慮し、それにその動く速度の 2 乗を掛けねばならない。弾性流体の重さは非常に小さいので、非常に大きな力学的パワーを発揮するエネルギー量は非常にわずかな量でしかない。

[*14] (訳注) 著者は、空気中を終端速度で落下している物体を想定しているようである。ただし、運動方程式に基づかないため、運動量とエネルギーの区別ができていない。

例：毎分 110 フィートの速度でピストンを動かすために、直径 6.18 インチのシリンダへ導入しなければならない蒸気量は、22.9 立方フィートであり、1 立方フィートの蒸気は、わずか 1 立方インチ水が気体状態になったものであるとすると、その 22.9 立方フィートはわずか 0.826 ポンドである。そのために、蒸気により発揮される力学的パワーは、毎秒 1.83 フィートの速度で動く 300 ポンドの圧力であるにもかかわらず、同じ蒸気のエネルギーは、毎秒 1.83 フィートの速度で動くそのわずかな重さのそれだけである。ピストンおよび装置の他の可動部分のエネルギーは、蒸気のエネルギーに関係があるにちがいないが、別の考察事項である[*15]。

3.10 勢い

「勢い (impetus)」または「勢い力」は、動いている物体から引き出される力学手パワーであり、その物体の速度の減少を引き起こすあらゆる障害物に対して及ぼされる力学的パワーである。それは動いている物体に常に存在している物質の慣性の結果であり、潜在的状態にある間はエネルギーと称される力学的パワーから派生し、それが活性化されたときに「勢い」と呼ばれる。

例えば、弾丸が固定された障害物に当てられて高速の運動状態から静止状態へ変わるとき、弾丸から引き出される力はその「勢い」と呼ばれる。あるいは、機械のはずみ車の「勢い」とは、その動きを妨げて速度を減少させるすべての抵抗に対してはずみ車が及ぼすパワーである。鍛治屋が頭のうえにかざして大きな速度で振り下ろすハンマーの打撃は、「勢い」のもうひとつの例である。

「勢い」の力は、動いている物体に与えられている運動から抽出された結果である。なぜなら、運動のあらゆる喪失は、最初に物体に伝えられて運動を引き起こしたすべての力学的パワーの復元を、必ず伴うからである。

「勢い」の尺度：動いている物体の「勢い」はそのエネルギー、つまりそれに内在する力に由来するので、「勢い」は、それが作用して速度が減少する前後の、エネルギーの差により表されるであろう。

もし運動が完全に破壊されて物体が静止状態になれば、そのとき、「勢い」は物体が持っていた全エネルギーに等しくなるであろう。

実際の力学問題で生じるほとんどの場合では、動いている物体の運動の一部だけが物体から引き出されて、物体にはいくらかの運動が残されている。動いている物体に障害物が作用してその速度を一定量だけ減少させるとき、そのエネルギー量つまり「勢い」の力は、その前後の各速度の 2 乗の差により表されるであろう。

例：毎秒 40 フィートの一様な速度で動いている 1 立方フィートの鋳鉄が毎秒 20 フィートの一様な速度に減速されるとき、その変化に抵抗して作用するエネルギー部分つまり「勢い」の力は、最初の速度に伴う「勢い」(1 立方フィート $\times 40 \times 40 =$) 1600 と、最後の速度に伴う「勢い」($1 \times 20 \times 20 =$) 400 との差であり、1200 と表すことができる。ここで、毎秒 20 フィートの速度で動く他の 4 立方フィートの物体を考え、それが、毎秒 10 フィートの速度まで減速されると仮定すると、最初の速度に伴う「勢い」は (4 立方フィート $\times 20 \times 20 =$) 1600 であり、最後の速度に伴う「勢い」は ($4 \times 10 \times 10 =$) 400 であり、これら二つの差は 1200 となる。したがって、いずれの場合も速度の変化は物体が持っていた速度の半分であり、その変化の間に同じ量のパワーが「勢い」として取り出されている。

3.11 質量の尺度

質量はその重さによって測定されることは既に述べたが、慣性は重さと同じく物質の普遍的な性質であり、物体の重さに影響するなんらかの原因による偏差の影響を受けない。なぜなら、物体の重さは地球の引力の作用に過ぎず、地球の形と (中心への) 近さに依存するからであり、それは地球の異なる場所で値が異なり、そ

[*15] (訳注) この書の当時、熱力学は確立されておらず、気体の状態変化について、フランスのラプラスやポアッソンらにより、種々に論じられていた時期である。ここで議論している問題は、熱力学の諸原理を用いて扱う必要があり、ピストンから取り出せる仕事と蒸気の速度エネルギーとの間には、直接の関係はない。

の地表から離れると減少する。物体にある運動速度を与えるために必要な力つまり力学的パワーは、それが含む物質の量の尺度でもあり、上述の重力の偏差の影響を受けない。

(p.20) 物体がある定まった方向へ自由に動くことができるように吊り下げられて、空気抵抗や摩擦抵抗およびそれ自身の重力の作用は、その吊り下げ方法により無視できるように工夫されているものと仮定する。その慣性に打ち勝って物体を動かすには、ある駆動力が必要であるが、仮定している場合では、最小の力で十分であり、種々の物体に同じように作用する同じ力は、それぞれの物体の質量に応じて異なる大きさの速度を与えるであろう。

このような条件下の物体は、プーリに通した紐の両端に吊るした二つの等しい重りで例示することができる。それらはお互いに完全につり合っているが、それらの一方にわずかの重みを加えることにより、両者は動き始めるであろう。このようにつり合わされたいく組かの重りのペアを、次々に試験すれば、ある距離にわたって同じように作用させてある速度にするために、それぞれの重りのペアに追加しなけらばならない重りの力学的パワーは、そのように動かされる物質の量に比例することがわかるであろう。

このようにして、物体内の物質の量を推定すると、その実験が地球の表面の同じ部分で試みられるとき、それはそれらの物体の重さに比例することがわかる。したがって、前に述べたように、物質の量の尺度として一般的に重さを採用することができる。

真空中での物体の落下と振り子の振動とは、同じ事実を示す。なぜなら、すべての種類の物体は同じような状況下では同じ速度で落下し、同じ長さの振り子は、その重さや物質の種類が何であっても同じように振動するからである。しかし、同じ振り子は、地球の異なる場所へ移動されると振動が異なることがわかる。なぜなら、慣性力はすべての場所で同じである一方で、重力は変化するからである。

同じ物体に異なる速度を与えるのに要する力学的パワー：前述の場合のように、それ自身の慣性を除いてどんな抵抗も働かないとし、それに非常に小さい力を作用させて動かすと仮定する。そのとき、その力が一様に継続されるならば、物体の速度は一様に増加するであろう。これは一様な加速度と呼ばれる。ここで、同じ物体に種々の速度を伝えるために要する力学的パワーは、得られた速度の 2 乗に比例することがわかるであろう。これは、前に述べたエネルギーの尺度である。

与えられた量の力学的パワーは、それが与えられた同じ物体の中に常に与えられた速度を生み出すであろう。なぜなら、物体にそのパワーが、大きな力で短時間だけ作用するように加えられるか、またはより小さい力でより長時間にわたって作用するように加えられるかにかかわらず、同じパワーが物体に伝達されれば同じ効果が生じるからである。力学的パワーの実際の尺度は力が作用する距離に依存し、その時間や作用の仕方には依存しない。

物体に一様な力を作用させて加速するようにパワーが加えられるとき、物体に伝えられる速度はその力が作用した時間に比例するであろうが、力が作用する間の速度が増加しているために、伝達されるパワーの量は時間の 2 乗に比例するであろう。なぜなら、物体の運動が一様に増加している間に物体が通過する距離は、常に時間の 2 乗に比例しているからである。

注意：速度の 2 乗によるこの尺度は、駆動力に対する唯一の抵抗が物質の慣性である場合に、加速運動によって得られるエネルギーにのみ適用される。このような場合、なされるすべてのパワーは、運動している物体が持つエネルギーの中に蓄積されていることがわかるであろう。

しかし、力学的パワーが克服すべき反対向きの力により物体の運動が抵抗を受けるとき、ある時点までの加速によりそれが蓄積されて動的平衡が得られて以降、その運動は一様になり、そして、それ以降に行使される力は、実際に抵抗力を克服するために消費されるであろう。

一様運動の場合、加速運動の場合のようにパワーの蓄積が進行することはない。このため、伝えられて加速運動を生み出す力学的なパワーは「速度の二乗」として生成される (またはむしろ累積される) にもかかわらず、生成された一様な運動を持続するために抵抗に打ち勝つのに消費される力学的パワーは、抵抗力に対抗して「速度の一乗」に比例して継続するであろう。

(p.21) 加速により生じた速度の場合、伝えられた力学的パワーは運動する物体のエネルギーの中に蓄積され、そこに保存されて、忠実に再現される準備ができている。運動が一様に継続する場合は、力学的パワーは抵抗力に打ち勝つために規則的に費やされていくので、蓄積することはあり得ない。

4　落下物体の加速運動の法則

重力は他の力を比較し測定するための標準とされているので、物体内に生じる運動の量を述べるためにもそれは重要である。

重力は、すべての物体を地球の中心へ向かって近づけようとする一定の作用により示される。この力は地球の表面で最大であり、その上方でも下方でも減少していき、また、地球表面上でも場所により変化する。

地球の表面から上方へ上がるにつれて、その引力は中心からの距離の 2 乗に反比例してその引力は減少する。そのため、地球中心から 3960 英マイル離れている地表に位置する物体は、地表から 3960 マイルの距離離れた位置、つまり地球の中心から 7920 マイルの位置にあるときの引力の、4 倍の力で引き寄せられる。

地表の下方の地球の内部に位置している物体への引力は、単にその中心からの距離に直接比例する。したがって、中心から 1980 マイルの距離では、引力は地球の表面で大きさの半分のでしかないであろう。

引力は地表の異なる場所でも変化し、極地で最大で、赤道で最小となる。これは、部分的には赤道で地表が極地での表面よりも中心から離れていることから生じ、また、赤道での遠心力 (が大きくなること) の影響もある。

我々がアクセスできるこれらの状況のいずれにおいても、このような引力の変化は、落下する物体の運動に感知できるほどの相違を生み出すほど十分に大きくはなく、実用的な目的には、重力は一様であり一定の値で作用していると見なすことができる。

地球の中心に向かって近づかないように抑制されている任意の物体または物質の質量は、それを支えて静止または運動を抑制している物体に対して、重力により静止力 (quiescent force) つまり一様な圧力を及ぼしており、この力は重さと呼ばれ、前述のように物質の量に比例する。

地球の中心に向かって近づかないように拘束されていない物体は、重力により直線運動をさせられ、普通の言葉で言えば、それは落下するであろう。物体がまったく抵抗を受けず、物質の自然な慣性から生じるものを除いては何の反対向きの作用が働かず、この重力に自由に従うのであれば、その物体は直線的に動くつまり落下し、その速度は、動き始めた時から連続的に増加して、地表に到達するまで、または他の障害物により動きが止まるまで続くであろう。

重力は一様で一定の作用をおよぼすので、物体がその運動を始めた後も、落下する物体を駆動し続ける。そして、それが落下により既にどんな大きな速度を取得していたとしても、それがさらに落下する限り、重力はそれに絶えずより大きな速度を追加するであろう。

落下する物体の運動は、等しい時間間隔で等しい速度増分が得られるので、**一様加速**されていると言われ、結果的に、得られる速度は運動の開始から時間に比例して増加するが、そのように増加する速度の間に通過される距離は、時間と速度の両方の積であるので、開始からの時間の 2 乗に比例、または最後に取得した速度の 2 乗に比例しなければならない。

(p.22) このようにして、

落下物体の速度は	落下に要した時間に比例、または 落下した高さの平方根に比例。
落下物体が通過する高さは	落下で得た速度の 2 乗に比例、または 落下に要した時間の 2 乗に比例。

したがって、等間隔の時刻を仮定し、1、2、3、4、5 等の数字で表すと、その時刻に物体が落下して取得している速度は、同じ数字で表されるであろう。しかし、それらの高さ、つまり静止位置から下降した位置までの距離は、1、4、9、16、25 等の数字で表されるであろう。

物体が静止状態から一様加速された速度で通過する距離は、あらゆる場合で、最終的に取得した速度の 2 乗に比例する。

物体がある与えられた高さを落下することにより取得する速度は、その高さによる速度と呼ばれ、逆に、その高さは速度による高さと呼ばれる。

実験によって確かめられたところによると、静止状態から自由落下する物体は最初の 1 秒間で 16 $\frac{1}{12}$ フィート降下し、そして、その速度は一様に増えて、次の 1 秒間では 32 $\frac{1}{6}$ フィート進む速度となるであろう*16。物体が静止状態から一様な加速運動で落下する高さは、すべての場合で、最後に得た速度で同じ時間一様に動いて通過する距離の半分である。物体が落下する間の速度の増加率は、$\frac{1}{4}$ 秒ごとに 8 $\frac{1}{24}$ フィートであり、重力が落下物体に作用して引き続き運動させる効果は、最初の 3 秒間について、表 1 のとおりである。

(p.23) 落下する物体の速度は極めて頻繁に知る必要があり、起こり得るすべての場合を計算するために、以下の規則が記述されなければならない。

I. **任意の時間落下することにより物体が取得する速度を求めること。**

規則：時間 (秒) を 32 $\frac{1}{6}$ 倍すると、それは取得する速度 (フィート/秒) となる。

例：4 秒後の落下速度は 4 ×32 $\frac{1}{6}$ = 128 $\frac{2}{3}$ フィート/秒となる。

計算式 (訳注)：*17

$$(\text{速度 [ft/s]}) = \left(\text{重力加速度}; 32\frac{1}{6}\ \text{ft/s}^2\right) \times (\text{落下時間 [s]})$$

II. **ある所定高さ落下することにより物体が取得する速度を求めること。**

規則：高さ (フィート) を 64 $\frac{1}{3}$ 倍すると、その積の平方根は取得する速度 (フィート/秒) となる。または高さの平方根を 8.021 倍すると、同じ結果が得られる。

例：257 $\frac{1}{3}$ フィート落下すると、257 $\frac{1}{3}$ ×64 $\frac{1}{3}$ = 16555 $\frac{1}{9}$、その平方根は 128 $\frac{2}{3}$ フィート/秒 となる。または 257 $\frac{1}{3}$ の平方根 は 16.04 であり、×8.021 = 128 $\frac{2}{3}$ フィート/秒 となる。

計算式 (訳注)：

$$(\text{速度 [ft/s]}) = 32\frac{1}{6}\ \text{ft/s}^2 \times (\text{落下時間 [s]})$$
$$(\text{落下距離 [ft]}) = \frac{1}{2} \times 32\frac{1}{6}\ \text{ft/s}^2 \times (\text{落下時間 [s]})^2$$

*16 排気された容器内で、物体をある高さ落下させる実験が行われてきた。しかし、この方法は高い精度を得にくいために、重い物体が 1 秒間に落下する高さは、1 秒に 1 回振動する振り子の長さから推測された。

ロンドンで海面高さ位置の真空中で吊り下げられて 1 秒間に 1 回振動する振り子は、39.1386 インチ長さであることが、キャプテン・ケイター (Kater) により測定されている。その長さは、華氏温度計で 62 度の温度のもとで、ジョージ・ショックバラ (George Shuckburgh) の標準的な真ちゅう製スケールにより測定された。測定されている振り子の長さは懸垂物体の中心から振動中心までである。振り子が小さな円弧で一回振動する (訳注：半周期) 間に、重い物体は、懸垂中心から振動中心まで測った振り子の長さの 4.9348 (= $\pi^2/2$) 倍の距離落下することを示すことができるであろう。

この比率の理由は、振り子が一回振動する時間と重い物体が振り子の長さの半分を落下する時間との比は、円の円周とその直径との比、つまり 3.14159 : 1 に等しくなるからである。今、物体が落下する高さは、落下時間の 2 乗に比例するので、振り子が一回振動する間に物体が落下する高さと振り子の長さの半分との比は、円周の 2 乗と直径の 2 乗との比、つまり 9.8696 : 1 に等しい。その結果、その落下高さと振り子の全長との比は、(9.8696 の半分の) 4.9348 : 1 に等しくなる。ここで、39.1386 インチの 4.9348 倍は 193.141 インチ、つまり 16.095 フィートであるが、それは 1 インチの小数部は無視されて、通常 16 $\frac{1}{12}$ フィートであると述べられている。

*17 (訳注) 原文では、この部分に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。

表 1　真空中の重い物体の落下運動

落下高さ (ft)	経過時間 (s)	取得速度 (ft/s)
0	0	0
$1\frac{1}{192}$	$\frac{1}{4}$	$8\frac{1}{24}$
$4\frac{1}{48}$	$\frac{1}{2}$	$16\frac{1}{12}$
$9\frac{3}{64}$	$\frac{3}{4}$	$24\frac{1}{8}$
$16\frac{1}{12}$	1	$32\frac{1}{6}$
$26\frac{25}{192}$	$1\frac{1}{4}$	$40\frac{5}{24}$
$36\frac{3}{16}$	$1\frac{1}{2}$	$48\frac{1}{4}$
$49\frac{49}{192}$	$1\frac{3}{4}$	$56\frac{7}{24}$
$64\frac{1}{3}$	2	$64\frac{1}{3}$
$81\frac{27}{64}$	$2\frac{1}{4}$	$72\frac{3}{8}$
$100\frac{25}{48}$	$2\frac{1}{2}$	$80\frac{5}{12}$
$121\frac{121}{192}$	$2\frac{3}{4}$	$88\frac{11}{24}$
$144\frac{3}{4}$	3	$96\frac{1}{2}$

より

$$
\begin{aligned}
(\text{速度 [ft/s]}) &= \sqrt{2 \times 32\frac{1}{6}\ \text{ft/s}^2 \times (\text{落下距離 [ft]})} = \sqrt{64\frac{1}{3}\ \text{ft/s}^2 \times (\text{落下距離 [ft]})} \qquad \text{, or} \\
&= 8.021\ \text{ft}^{(1/2)}/\text{s} \times \sqrt{(\text{落下距離 [ft]})}
\end{aligned}
$$

III. **与えられた任意時間で物体が落下する高さを求めること。**
規則：その時間 (秒) の 2 乗に 16 $\frac{1}{12}$ を掛けると、落下高さ (フィート) となる。
例：4 秒とすると、その 2 乗 = 16 、×16 $\frac{1}{12}$ = 257 $\frac{1}{3}$ フィートとなり、これが落下高さである。
計算式 (訳注)：

$$
(\text{落下距離 [ft]}) = \frac{1}{2} \times 32\frac{1}{6}\ \text{ft/s}^2 \times (\text{落下時間 [s]})^2 = 16\frac{1}{12}\ \text{ft/s}^2 \times (\text{落下時間 [s]})^2
$$

注意：上のすべての規則は、逆に使うこともできる。例えば、
I. 物体が所定の速度を取得するために落下しなければならない時間を求めること。
II. 物体が所定の速度を取得するために落下しなければならない高さを求めること。
III. 物体が所定の高さ落下するのに要する時間を求めること。

(p.24) 重力により物体が落下する速度は、その重さ、形、密度または大きさの影響を受けない。なぜなら、物体のすべての物質の粒子は、単独の粒子がそれ自身で落下しても、または、多数の粒子が一つの物体に結合されていても、地球に等しく引き付けられているからである。物体は真空中を落下すると仮定されているので、その運動に対する抵抗は、その慣性を除いて除かれている。空気ポンプで排気された容器内で物体を落下させる実験により、最も重い金属も最も軽い羽根も、まったく同じ速度で落下することが見出されている。物体が空気中を落下するときは、空気は物体の運動に対してその速度のほぼ 2 乗に比例する抵抗を引き起こす。またこれに加えて、物体が水柱を落下するときと同様に、微小ではあるが空気が物体に上向きの浮力を及ぼし、物体の重さから若干の値を差し引く。したがって、物体が空気中に落下するとき、その速度は上記の値より小さくなり、その速度の減少量は、物体の密度、形やその他の条件に依存するであろう。

鉛直上方へ投げ上げられた物体の運動：物体が機械的な力により鉛直上方へ投げ上げられた場合を考える。その初速度は、ある高さから物体を落下させたときの速度であるとする。物体は、一様に速度を減少しながら上昇し、それを最初に落としたと仮定した高さに達するであろう。この場合、上昇運動の時間と速度は下降運動のそれらと全く同じであるが、速度の変化は逆の順序で生じる。これは、逆転された動き (retarded velocity ?) である。

斜面を転がる物体の運動：これまで述べた落下物体のすべての法則は、物体が鉛直に、または地球の中心に向かって真っすぐに落下するという単純な場合である。斜面を降下する物体も同じ加速の法則に従い、以下のように、同時に鉛直に落下する物体の高さに関連付けることができる。斜面の下端に接触する鉛直線を仮定し、斜面の上端から水平線を引くとする。この水平線と鉛直線の交点から斜面の下端に向かってある物体を落下させる。同時に、斜面の上端から下端へ向かって別の物体を落下させる。斜面の下端までで両物体が取得した速度は、両場合で同じ値になるであろう。

4.1 重心

重心とは、任意の固体物体についてその全重さがその点に集中されていると仮定することができ、その点で物体が吊るされるならば、物体のすべての部分の重さはすべての位置で互いにつり合うような点である。例えば、均質な物質の球では重心は球の中心である。なぜなら、球がその中心で吊るされるとすると、球は任意の方向へ回ることができ、かつ常につり合い状態にあるからである。一様な大きさで一様な物質の真っ直ぐな棒、杖またははり (はり) では、その重心はその長さの中央になる。

重心は、常に物体の内部にあるとは限らない。例えば、輪、または中空の円柱、球、カップでは、その重心は中空の空間内の点となるであろう。しかしながら、すべての物体は重心を持っており、いくつかの物体が様々な間隔で互いに結合されて構成された系でも同様である。

物体が重心を動かさずにその重心回りに運動を行うとき、物体の各部分だけが影響を受けるが、重心が移動するときは、それは質量全体の実際の運動として考えるべきである。例えば、もし物体の重心が動かないように支えられているのであれば、それはそれに重心回りに回転しているのであり、地球方向への質量の降下はない。なぜなら、その一部分が降下するにもかかわらず、他の部分が正確に等価に上昇しているからである。

直線運動のすべての場合で、物体が動いていると言われるときの速度は、実際には、その重心が直線に沿って移動する速度である。なぜなら、直線運動では、中心回りに回転して転がる物体のような別段の断りがない限り、物体のすべての部分は同じ速度で動くと仮定されているからである。また、これらの転がる場合でも、物体の直線運動は、その重心が直線に沿って進行することに基づいている。

重心の位置が既知であれば、力学的な論考を非常に簡単にすることができる。なぜなら、それにより、重さは全体として重心に作用すると考えて、物質の全質量の平衡の条件を容易に簡単に述べることが可能となるからである。いくつかの場合で、このことを示そう。

もし、物体の重心が物体の重さに等しい力で支えられているならば、それはあらゆる可能な姿勢でつり合いを保つであろう。

もし、重心が支点と同じ鉛直線内にあるならば、物体は平衡状態にあるであろう。しかし、この場合は、前記のようにあらゆる姿勢でつりあうことはできず、重心が支点よりも鉛直上方にあるときは、少し傾けるとその平衡は完全に崩れるであろう。これは bf 不安定な平衡と呼ばれ、先端や角の上で物体のつり合いを取ったり、卵をその先端の上でつり合いを取るのは困難である。重心が吊り下げている支点の真下にあるときは、平衡が乱されると、いくらか振動した後に平衡は回復するであろう。振り子の場合、または下げ振り糸 (plumb line) の場合は、これに該当する。

(p.25) 物体が水平面の上に置かれているとき、重心を通る鉛直線が底面の内側にある場合、物体は立っているであろう。しかし、その鉛直線が底面の外へ落ちると、物体は倒れるか転覆するであろう。そして、その鉛直線が底面内にあるとき、それがその底面の境界の内側へ更に入るほど、その位置での物体の安定性は大きくなるであろう。

それが置かれる底面上方の高い位置に重心がある物体は、同じ底辺でより低い位置 (底面に近い位置) に重心がある物体より、より小さい傾斜で転倒し、そのため、より頻繁に偶然により転覆するであろう。

■一様密度の種々の物体の重心を決定する方法 .

直線：凝集力により直線上に連結した一連の等しい粒子を仮定すると、その重心は明らかにその長さの中央にある。

任意の三角形の面：任意の頂角から対辺を二等分する直線を引くと、その重心はその線上で底辺から $\frac{1}{3}$ の位置となる。

平行四辺形の面：重心は、(2 本の) 対角線が互いに交差する点である。または、対辺を二等分する (2 本の) 直線の交点として求まる。

任意の正多角形の面：辺の数が偶数の場合は、反対側の角を結ぶ 2 本の対角線を引く。辺の数が奇数の場合は、二つの角から対辺への垂線を引く。いずれの場合も、そのように描いた線の交点が重心である。

角柱および円柱：これらの立体では、重心はその (中心) 軸上、または両端面の重心を結ぶ直線上の中点である。なぜなら、そのように引かれた直線は、その立体を端面に平行な薄層 (lamina) に分割したと考えたとき、すべての薄層の重心を通過するからである。

多角錘および円錐：この場合も、重心はその頂点と底面の重心とを結ぶ軸つまり中心線上にあるが、この線 4 等分されなければならない。その重心は、その中心線上の底面から $\frac{1}{4}$ の位置である。

これより、同じ高さのすべての多角錘と円錐について、それらの重心は底辺上の同じ高さになる。

平面で囲まれたすべての立体は、多角錘に分割することができ、それぞれの重心は今説明した方法で求めることができるであろう。

半球：半球の重心はその軸、つまり底面の中心を通るその垂直線上にあり、その全長 (つまり球の半径) の底面中心から $\frac{3}{8}$ の位置に位置している。

物体の形やその密度が不規則であるとき、重心は、以下のように実験的に求められる。物体を、順番にいくつかの異なる点に紐を取り付けて吊り下げてつり合わせ、物体内を貫通して作られるいくつかの紐の方向 (直線) を想定する。それらの方向をた弦のいくつかの方向を仮定します。それらすべての方向が互いに交差する点が重心である。

単に物体の一端から重心までの距離を知るのであれば、任意の鋭いナイフエッジの上で物体をつり合わせると、重心はその時、そのナイフエッジの鉛直上方にあるであろう。

4.2　直線運動

直線運動とは、物体が直線を描いて動くときの運動である。物体を直線の経路から横へそらせる何らかの外力が作用しない限り、物体は常に直線的に動くので、それは物体の自然の動きであり、物体はその慣性により、直線からそらそうとするような力に抵抗する。

直線運動では、物体がそれ自身の重心回りに回転する場合を除き、物体のあらゆる部分は同じ速度で移動する。物体が、ある与えられた長さの直線運動を描いた後、同じ直線上を戻るとき、それは往復運動と呼ばれる。

4.3　曲線運動

曲線運動は、物体が曲線を描いて動くときの運動である。動いている物体は、その状態を維持しようとする性質が障害物または逆向きの力により妨げられるまで、その慣性により同じ速度で同じ方向へ動き続ける。その結果物体は、常に作用する力の影響を受けるか、または、あらゆる瞬間にその運動の方向を変えて直線からそらす継続的な一連の妨害を受けない限り、曲線を描くことはできない。

このため、一つの石を水平または斜め上方へ空中に投げた場合を観察すると、重力が絶えず働いて、 r 当初伝達された運動の方向を変える。しかし、その慣性が石を直線的に進めようとし、重力の作用を修正して、それが一度に落下しないようにするので、慣性と重力の間には永続的な争いがあり、そのために運動の方向は絶えず変えられて曲線運動となり、その経路は放物線の一部となる。また、石または他の重りをスリング (投石器) に吊るして、それを回して円運動させたとき、回されている円運動から石が外れようとするのを手で感じることができ、そして、石をスリングから解放すると、そのために石はその円周に接する直線に沿って飛んで行き、もし重力がそれを地球に向かって引くように作用しなかったならば、石はそのまま直線運動し続けるであろう。

(p.26) すべての曲線運動において、動いている物体の異なる部分は描かれる曲線の凹面側や凸面側に位置するので、それに応じて異なる速度で動かなければならない。

4.4　自由な運動

自由な運動とは、物体が妨害なくあらゆる方向へ自由に動くことができる状況での運動である。一度動かされた絶対的に自由な物体は、直線上を一様速度で動くことができるだけであろう。しかし、我々が知っているすべての物体は何らかの力の影響を受け、そのためこの自然の運動は修正を受けて、曲線運動や可変速度運動が生み出される。ある物体が他のすべての物体と接触することなく、したがって、それ自身の一様な直線運動をしようとする自然の傾向と、それに作用してその自然の運動を変えようとするすべての様々な力との間の、一定の平衡を維持するような方向と速度で自由に動いているとき、その物体は自由に運動していると言われる。

天体に関する場合がこれに該当する。月は地球の回りを回転し、地球と他の惑星は楕円軌道で太陽の回りを速度を変えながら回転する。その運動は、中心物体へ向かう引力つまり重力による求心力と、最初に伝達されて常に直線運動を続けようとする力により生み出される遠心力との複合効果から生じる。

また、投射体、つまり空中で斜め上方に投げ出された物体は、地球から離れていき、そして、最初にそれに加えられた発射力と地球の引力の両作用の結果、放物曲線を描いて地球に戻る。しかし、この運動はそれが通過する空気の抵抗により修正されるので、そのような投射体は、他の物体との接触から完全に自由ではないので、惑星ほど自由とないえない。真空の空間内を地球へ向かって鉛直に落下する物体は、自由な運動の一つの例である。

4.5　拘束運動

拘束運動とは、物体が他の物体との実際の接触により強要されて特定の方向へまたは指定された速度で行う運動である。たとえば、一本の軸に固定されて力学的パワーで回される車輪では、すべての部分は共通の中心回りに描かれる円内で回転するように拘束されており、中心から異なる距離にある部品は異なる速度で動かねばならない。このように円内で動くように拘束される物質は、重力および慣性・遠心力により、その円運動をやめるように請願されるかもしれないが、自由にそうすることはできない。

機械のすべての動作は拘束運動の部類に属し、自由運動の例を見つけることができるのは、真空中の物体の落下の例と天体の運動の中だけである。したがって、我々の注意が特に向けられなければならないのは、拘束運動を考えることである。しかしながら、前述の定義はもっぱら自由運動に関するものであり、それは、物体が自由に従うべき運動法則が我々の基準でなければならないからである。自由運動の法則は確立されているので、我々は、物体に人工的な運動を強要している特定の拘束の影響を考慮することができる。

ある点ではほぼ自由であり、他の点ではほぼまたは全く拘束されて動いている物体の例を、頻繁に見ることができる。例えば、海上を帆走する船は、風の力と水の抵抗から生じる任意の方向と任意の速度で、ほぼ自由に水平運動することができるが、それは、それ自身の重力と水との接触によりある範囲で束縛されていて、それを超えて上下に自由に動くとは言えない。水平面上を転がる球形のボールは、さらに明白な場合である。ボールは水平方向には自由に動くことができるが、平面との接触により、絶対的に水平方向の運動に制約されている。または、紐で吊り下げられた重りは、その支点を中心とした球面の一部を動くように拘束されているが、その球面内で任意の方向へ自由に振動することができる。

4.6　円運動

(p.27) 円運動は、物体がその運動で円を描くように拘束されているときの、曲線運動の特殊な場合である。物体が完全な円を描くように動き続けるならば、それは**回転運動**、または連続円運動と呼ばれ、そして物体は

円内で**回転する**と言われる。その円の中心は**運動中心**または**運動の軸**と呼ばれる。

すべての円運動において、直線運動からの偏差または逸脱は、そのコースのあらゆる部分で同一に生じ続け、回転物体は軸つまり運動の固定中心から一定の距離を保たねばならない。

4.7 遠心力

曲線運動を描く物体における遠心力は、その曲線から離れて自然な直線運動をしようとする、物体が持つ不変の性質の結果である (慣性の法則 p.14 を参照せよ)。

これは、スリングの中の石を回転させる場合に非常に明白である。なぜなら、石を円軌道に沿って回している限り、それは、運動の中心から離れて飛び出そうとするかなり大きい作用をする。この作用は遠心力と呼ばれる。その力の理由もスリングの場合では非常に明白であり、その石を離してその遠心力を作動させる瞬間、石は円から離れて直線運動を行うのを観測するであろう。

4.8 求心力

求心力は遠心力に対抗して物体をその曲線軌道に保つのに必要な力であり、また、重力は天体に作用してそれをその軌道に保持する求心力である。

スリングの例では、石が中心から飛び出そうとするのに対して、紐の強度が逆向きに作用している。**注意**：自由な円運動ではすべての場合、求心力は遠心力と正確に等しく、また方向が反対向きでなければならない。なぜなら、中心から遠ざかろうとする傾向がそれに近づこうとする傾向に等しくない場合、その中心からの一定の距離が維持できないからである。機械類では円運動はほとんどの場合拘束運動であり、回転物体はその円形軌道に強制的に保持されている。その結果、そのような場合の遠心力は、逆向きに作用する力とつり合い、それによって動きが生じないような力であるので、圧力と同じ性質の力である。

すべての拘束円運動の場合では、遠心力は物体を運動中心から更に遠ざけるように作用することはできない。そのため、遠心力は運動の法則の変更を引き起こすことはできず、また、物体がその円に沿って前後へ動く力の変更を引き起こすことはできないので、直線運動のすべての法則は円運動にも等しく適用される。唯一の違いは、直線運動では、重心が直線に沿って動く速度は全質量の速度についてとられるべきであるが、円運動では、回転半径上の点 (centre of gyration) *18 と呼ばれる別の点がその目的のために採用されなければならない。なぜなら、軸つまり運動中心から最も遠い部分の質量は、運動中心に近い部分よりも大きな速度で移動するからである。

円運動における物体の遠心力の尺度：大きな円の曲率は小さい円のそれより直線との偏差がより小さいため、円軌道で回転されている物体は、その遠心力によりそれが許される最大の円を描くであろう。物体が小さい円を描くときは、大きい円を描くときより、慣性の法則からのずれはより大きくなる。このため、重さと速度の他のすべての状況が同じであれば、遠心力はその物体が回転して描く円の円周に反比例する。

与えられた時間内に任意の円軌道を回転する物体の遠心力は、一定の時間内にその回転が行われるのであれば (訳注：回転速度が同じであれば)、円の直径に比例する。

例：直径 20 フィートのはずみ車の円形リムは直径 10 フィートのもう一つのはずみ車と同じ重さであり、両はずみ車が同じ周期で回転するとき、大きいはずみ車にリムは小さい方のリムの 2 倍の遠心力をうけるであろう。

計算式 (訳注)：同じ重さの物体が同じ回転数で回転運動をするとき、

$$(\text{遠心力 [lb]}) \propto (\text{直径 [ft]})$$

注意：物体が円軌道上を移動する速度を推定する際には、回転半径上の点が円運動するときの速度を全質量の平均速度として用いなければならない。それは、回転をしない直線運動でのみ用いられる重心とは異なっている。

*18 (訳注) centre of gyration は、「回転軸から回転半径だけ離れた任意の点」の意味で用いられている。これを「回転中心」と訳すと回転軸の意味に誤解されるので、この翻訳に際してはできる限り「回転半径」を用いた表現に書き換えることとする。

(p.28) **同じ円軌道を異なる速度で動いている物体の遠心力**は、円軌道を動く速度の 2 乗に比例する。または同じことであるが、与えられた時間内に行う回転数の 2 乗に比例する。

例：はずみ車のリムの遠心力は、それが毎分 40 回転するときは、毎分 20 回転しかしないときの 4 倍になる。

計算式 (訳注)：同じ重さの物体が同じ円軌道を異なる速度 (または異なる回転数) で回転運動をするとき、

$$(\text{遠心力 [lb]}) \propto (\text{速度 [ft/s]})^2 \propto (\text{回転数 [rpm]})^2$$

与えられた重さの物体の遠心力を求めるための一般的な規則：与えられた直径の円軌道である一様速度で回転する、与えられた重さの物体の遠心力を求めるための一般的な規則は、ロピタル侯爵[*19]により見出された。

それは、物体の回転中心がその円軌道で回る速度を得るために必要な、重力による落下高さに基づいている。そのとき、円軌道の半径は速度に基づく高さの 2 倍であり、物体の重さも遠心力に比例する。したがって、次の規則が成り立つ。

規則：速度 (フィート/秒) を 4.01 で割ると、その商の 2 乗は、速度に基づく高さ (フィート) の 4 倍である。この 4 倍の高さを円の直径 (フィート) で割ると、その商は重さ 1 の物体に働く遠心力である。その結果、それに物体の重さ (ポンド) を掛けたものが実際の遠心力 (ポンド) を与える。

例：直径 20 フィートのはずみ車のリムが毎秒 32 $\frac{1}{6}$ フィートの速度で動くと仮定する。このとき、 $32.16 \div 4.01 = 8.02$ となり、その 2 乗は 64.33 となり、これが速度による高さの 4 倍である。これを直径 20 フィートで割ると 3.216 となり、これにリムの重さを掛けたものが遠心力である。すなわち、遠心力は回転体の重さの約 3 $\frac{1}{4}$ 倍である。

計算式 (訳注)：上の規則をそのまま式で表すと

$$4 \times (\text{高さ [ft]}) = \left(\frac{\text{速度 [ft/s]}}{4.01}\right)^2$$

$$(\text{遠心力 [lb]}) = (\text{重さ [lb]}) \times \frac{4 \times (\text{高さ [ft]})}{\text{直径 [ft]}} = \frac{\text{重さ [lb]}}{\text{直径 [ft]}} \times \left(\frac{\text{速度 [ft/s]}}{4.01}\right)^2$$

となる[*20]。

円軌道で回転する物体の遠心力と重さとの比を求める別の方法：円軌道の直径がフィートで与えられ、また、それが行う毎分の回転数が与えられる。

規則：毎分の回転数の 2 乗に円軌道の直径 (フィート) を掛け、その積を定数 5870 で割ると、その商は物体の重さ 1 あたりの遠心力である。

例：重さ 2 ポンドの石がスリングの中に入れられ、直径 4 フィートの円で毎分 120 回転の速度で回されたとすると、遠心力、つまり中心から飛び出ようとする力はいくらになるか？

毎分 120 回転の 2 乗は 14400 であり、×直径 4 フィート = 57600 、÷5870 = 9.81 となり、これが遠心力と重さの比である。重さ 2 ポンドであるので、スリングを壊して出て行こうとする遠心力は 19.6 ポンドである。

同じ問題は、前者の規則によって解くこともできる。軌道内での石の速度は (4 ×3.1416 = 円周 12.566 フィート、× 回転数 2 回/秒 =) 25.133 フィート/秒となる。その速度による高さは (訳注： $(25.133/4.01)^2/4 =$) 9.81 フィートとなる。その高さの 2 倍つまり 19.62 フィートと円の半径 2 フィートとの比は、物体の遠心力と物体の重さとの比、つまり 9.81 倍となる。

---

*19 (訳注) Guillaume François Antoine, Marquis de l'Hôpital (1661-1704)。

*20 (訳注の補足) 第 1 式 は自由落下のエネルギー式

$$(\text{質量}) \times (\text{重力加速度}; 32.175\ \text{ft/s}^2) \times (\text{高さ [ft]}) = \frac{1}{2} \times (\text{質量}) \times (\text{速度 [ft/s]})^2$$

より

$$4 \times (\text{高さ [ft]}) = \frac{2 \times (\text{速度 [ft/s]})^2}{32.175\ \text{ft/s}^2} = \left(\frac{\text{速度 [ft/s]}}{4.011}\right)^2$$

として求まる。

第 2 式の結果は

$$(\text{遠心力 [lb]}) = \frac{\text{重さ [lb]}}{\text{重力加速度}; 32.175\ \text{ft/s}^2} \times \frac{(\text{速度 [ft/s]})^2}{\text{直径 [ft]}/2}$$

を書き直したものとなっているが、これを落下高さに関連付ける根拠 (歴史的経緯?) は不明。

計算式 (訳注)：

$$
\begin{aligned}
(\text{遠心力 [lb]}) &= (\text{質量}) \times \frac{(\text{周速度})^2}{(\text{半径})} = \frac{(\text{重さ [lb]})}{32.175\ \text{ft/s}^2} \times \frac{\{\pi \times (\text{直径 [ft]}) \times (\text{回転数 [rpm]})\}^2}{60^2 \times (\text{直径 [ft]})/2} \\
&= (\text{重さ [lb]}) \times \frac{(\text{直径 [ft]}) \times (\text{回転数 [rpm]})^2}{5868}
\end{aligned}
$$

(p.29) 前述の規則により求まる回転物体の重さに単位重さあたりの遠心力を掛けたものは物体が運動中心から遠ざかるように及ぼす実際の力つまり圧力であろう。

任意の円軌道で回転する物体の遠心力がその重さに等しくなる速度を求めること。円軌道の直径がフィートで与えられたとして、必要な毎分の回転数を求める。

規則：定数 5870 を円軌道の直径 (フィート) で割ると、その商の平方根は遠心力が重さに等しくなる回転数 (回/分) である。

例：ある物体が直径 6.5 フィートの円軌道で回転するとき、5870 ÷6.5 フィート ＝ 903 であり、その平方根は 30.05 となる。これより、この場合に遠心力が重力と等しくなるには、その回転数は 30 回転/分でなければならない。

計算式 (訳注)：前項の結果より、

$$
(\text{回転数 [rpm]}) = \sqrt{\frac{5868}{(\text{直径 [ft]})} \times \frac{(\text{遠心力 [lb]})}{(\text{重さ [lb]})}} = \sqrt{\frac{5868}{(\text{直径 [ft]})} \times 1}
$$

4.9 円運動する物体の有効速度を求める方法

エネルギーおよび「勢い」の定義 (p.17 および p.19) では、動いている物体は直線を描くと仮定されている。しかし、物体が円運動するときの実際の速度を知ることができれば、その円運動にも同じ定義を適用できるであろう。

直線運動では、(物体は回転せずに) 物体のすべての部分は等しい動きをすると仮定され、そのとき、重心が慣性中心となる。しかし円運動では物体のすべての部分は運動中心からの距離が異なり、異なる運動速度をもたなければならない。そのため、物体各部のすべての異なる速度を、すべての質量の共通の速度と見なせる、ある共通速度つまり標準速度に引き直す方法が必要となる。

直線状に動いている物体の慣性中心は、重心である。これと同様に、円軌道で動く物体の慣性中心は、centre of gyration と呼ばれる仮想の点である。もし、その物体が軸つまり固定された運動中心のまわりに回転して、物体各部がその軸回りの円軌道以外の運動ができないのであれば、そのとき、それらの粒子はその慣性により、粒子自身の重さに運動中心からの距離の 2 乗を掛けた力で、ある与えられた点への運動伝達に対して抵抗するであろう。そして、物体が動いているのであれば、その慣性はその運動を一様に維持継続するために同じように作用するであろう。

4.10 円運動する物体の回転半径

円運動つまり固定中心回りに回転する物体の回転半径は、全質量の慣性効果またはエネルギーが集中していると考えられる点 (centre of gyration) までの半径である。円を描くつまり固定中心の回りを回る物体の各部分は、その固定中心からの距離に応じて異なる速度を持たなければならない。そして、動いている物体のエネルギーはその質量にその速度の 2 乗を掛けた積により測られるので、運動中心に近い物体部分のエネルギーは、そこからより遠い部分のエネルギーよりはるかに小さくなるであろう。

(p.30) 今、回転半径は、回転物体のすべての物質がその位置に集められたとすれば、その回転のエネルギーが、各部分が運動中心から異なる距離のそれぞれの元の場所に配置されたときのエネルギーと同じエネルギー

を持ち続けることになる半径である。

したがって、物体のその回転半径の位置に、回転半径が描く円の接線方向へある与えられた力が作用すると仮定すると、そのような力は、等しい質量の物質の重心に作用して直線上を動かすのと同じ速度で、その回転半径の点を円軌道に沿って動かすであろう。そのような質量は、自由でその動きに何の拘束もされていないと仮定されている。

その結果、回転体のすべての物質をその回転中心に集めることができれば、そのエネルギーは物体の全重さに、回転半径の先端がその円軌道上を動く速度の 2 乗を掛けることにより表される。

回転半径を用いると、円軌道を動いている物体のエネルギーを、直線状に動く同じ重さの物体のエネルギーと比較できる。後者のエネルギーは、全重さに重心が直線に沿って動く速度の 2 乗を掛けたもので表される。

回転物体の回転半径を求めること。

一般的規則：物体の各粒子の重さに軸からのその距離の 2 乗を掛け、これらすべての積の合計を全物体の重さで割ると、その商の平方根が、求める回転半径である。

例：3 個の砲丸 (砲弾) が一本の真っ直ぐなレバーに固定されているとする。レバーの重さは無いと仮定できる。一つの砲丸は重さ 2 ポンドで、運動軸から 10 インチの距離に固定され、他のものは重さ 4 ポンドで、軸から 6 インチの距離に、第 3 のものは重さ 6 ポンドで、軸から 4 インチの距離に固定されている。回転軸からの回転半径を求めよ。

ここで、2 ポンド ×10 インチ ×10 = 200 、4 ポンド ×6 インチ ×6 = 144 、6 ポンド ×4 インチ ×4 = 96 となる。これら三つの積の合計は (200 + 144 + 96 =) 440 であり、それを 3 個の重さ (2 + 4 + 6 =) 12 ポンドで割ると 36.66 となる。この平方根 6.05 インチが回転半径である。したがって、回転軸から 6.05 インチの位置に置かれて、同時に回転する 12 ポンドの重りは、それぞれの場所の 3 個の砲丸と同じ「勢い」やエネルギーを持っているであろう。

計算式 (訳注)：回転軸から $r_1, r_2, r_3, \cdots$ 離れた位置に固定された質量 $w_1, m_2, m_3, \cdots$ の重りが回転するとき、その回転半径 $\bar{r}$ は次式で与えられる。

$$\bar{r}^2 = \frac{\int r^2\ dm}{\int\ dm} = \frac{\sum_i m_i {r_i}^2}{\sum_i m_i}$$

これより

$$\bar{r} = \sqrt{\frac{2 \times 10^2 + 4 \times 6^2 + 6 \times 4^2}{2 + 4 + 6}} = 6.05$$

回転半径は物体または回転物体系の形状に依存する。前述の規則は、その重さが特定の点に集中していると見なせるすべての場合の物体に適用できるであろうが、他の物体には別の規則を使用しなければならない。これらの規則の起源は、以下の記事から明らかになるであろう。

4.11 重い物体に異なる速度を伝達するために必要とされる力学的パワーの量

その物質の慣性による抵抗以外の抵抗が作用しないとき、重い物体に異なる速度を伝達するために必要とされる力学的パワーの量について考える。

(p.31) これは、真空中を自身の重力で地表へ向かって落下する物体により、示すことができる。そのとき、運動を伝達する中でなされる力学的パワーは、物体の全重さに物体が落下する高さを掛けたものであり、落下する高さが伝達される力学的パワーの尺度であり、これは、すでに p.22 で示したように得られる速度の 2 乗に比例する。得られる速度について言えば、物体のすべての粒子は同じ速度で動くと仮定しなければならず、そしてこの条件では、落下物体の法則は、その運動の方向が自由であるか拘束されているかにかかわらず、その慣性に逆らって物体に伝達される運動すべてに対して、一般的に適用できる。そのように伝達されるパワーは、運動する物体のエネルギーと呼ばれる。

一般的規則：動いている物質の質量に落下させてその速度が得られる高さを掛けると、その積は、物体内にそのような

運動の速度を生み出す際に伝達される力学的パワーであり、その速度で動くときの物体のエネルギーと呼ばれる*21。

例：鉄道の貨車の重さが 2500 ポンドであるとすると、それを静止状態から時速 3 マイル、つまり毎秒 4.4 フィートの速度で動かすために、いくらの力学的パワーが貨車に伝達されなければならないか ?

毎秒 4.4 フィート ÷8.02 = 0.5487 であり、その 2 乗は 0.301 フィートとなる。これがその速度を得るために物体が落下しなければならない高さであり、その一様な速度で貨車は、1 時間に 3 マイル移動するであろう。したがって、伝達される力学的パワーは、(2500 ポンド ×0.301 フィート =) 752.5 ポンド・フィート*22となる。

注意：このようにパワーを行使するのは貨車を最初に動かすためにのみ必要であり、車輪の摩擦から来るどんな抵抗も含んでいない。一度克服した慣性は、それ以上のパワーの行使を必要としないが、運動を遅らせるために絶えず作動する摩擦は、別途考慮すべき事項である。

計算式 (訳注)：

$$(\text{力学的パワー [lb ft]}) = (\text{重さ [lb]}) \times (\text{高さ [ft]}) = (\text{重さ [lb]}) \times \left[\frac{(\text{速度 [ft/s]})}{8.02}\right]^2$$

注意：この規則により決定されるように、伝達されるパワーは、ゆっくり一様速度で 1 フィート降下することにより問題の力学的パワーを生じるような、物質の質量で表される。したがって、運動する質量がポンド重で表されるならば、得られる結果は、1 フィート降下するポンド重の数値で表される。また、質量が水または他の物質の立方フィートで与えられるならば、結果は、質量のその運動を生成するために 1 フィート降下しなければならない立方フィートの数値で表される。

例：運河用ボートが 400 立方フィートの水を排水するとする。それを静止状態から時速 3 マイル (つまり毎秒 4.4 フィート) の速度で動かすには、いくらのパワーを伝達しなければならないか？水の摩擦と抵抗を無視するものとする。また、毎時 6 マイル、つまり毎秒 8.8 フィートの速度を与えるためには、いくらのパワーを費やさなければならないか？

計算式 (訳注)：

$$(\text{力学的パワー [ft}^3\text{ ft]}) = (400\ [\text{ft}^3]) \times \left[\frac{4.4}{8.02}\right]^2 = 120.4\ \text{ft}^3\ \text{ft}$$

または

$$(\text{力学的パワー [ft}^3\text{ ft]}) = (400\ [\text{ft}^3]) \times \left[\frac{8.8}{8.02}\right]^2 = 481.6\ \text{ft}^3\ \text{ft}$$

(p.32) 任意の所与の速度を獲得して運動する物体において、そのような運動を伝達する際に及ぼされるエネルギーつまり力学的パワーは、その作用の時間や方法に依らず同じ値となるであろう (p.20 を参照)。

例えば、鉄道貨車またはボートが静止状態から動かされる際に、大きい力が 1 秒間に作用して行われるか、または、小さい力により 1 時間かけて非常に緩やかに感知できない程の加速度で、その運動を生み出すかに依らず、同じ速度を生み出すために、いずれの場合でも同じ量の力学的パワーが伝達される必要がある。

注意：力学的パワーを、所定の高さ降下するのに必要な重さで表そうとする際に、そのような降下はゆっくりと一様な動きで行われるべきことを、常に理解しておかねばならない。

---

*21 **与えられた速度となるために物体を落下させなければならない高さを求めること。**以前に p.23 で与えた規則を逆に用いて、

規則：速度 (フィート/秒) の 2 乗を 64 $\frac{1}{3}$ で割ると、その商は必要な落下高さ (フィート) となる。または、速度 (フィート/秒) を 8.021 で割ると、その商の 2 乗は落下高さ (フィート) である。

計算式 (訳注)：重力加速度 $32\frac{1}{6}$ ft/s^2 を用いて、

$$(\text{質量}) \times 32\frac{1}{6}\ \text{ft/s}^2 \times (\text{落下高さ [ft]}) = \frac{1}{2} \times (\text{質量}) \times (\text{速度 [ft/s]})^2$$

より、

$$(\text{落下高さ [ft]}) = \frac{(\text{速度 [ft/s]})^2}{64\frac{1}{3}\ \text{ft/s}^2} = \left[\frac{(\text{速度 [ft/s]})}{8.021}\right]^2$$

*22 (訳注) 原文では、「高さ 1 フィートを降下する 172.5 ポンド」 と表現されている。エネルギーは、当時常に重力の位置エネルギーとして考えられていたようであり、常にこのような表現が用いられているが、以下簡単のために、ポンド・フィート等の単位を用いて表記する。

運動を伝達する中でこのようになされたパワーは、失われたり消費されたりするのではなく、運動する物体の中に蓄えて置かれるだけであり、それがその運動エネルギーを構成している。なぜなら、運動している物体は、何らかの障害物が物体の運動の継続に対抗して停止または減少させようとしたときに、その力学的パワーの全部または一部を、その「勢い」の力により回復するからである (このことは pp.18-19 で詳しく説明されている)。

落下物体の法則は、運動する物体のすべての粒子が同じ速度を持つ場合に直接適用することができ、したがって、(その運動が) 自由なものか拘束されたものか、または水平方向か鉛直方向かによらず、直線運動のすべての場合を含んでいる。しかし、平面上を転がる物体は、その直線運動とは独立にそれ自身の中心回りに回転運動を行っているので、除外されなければならない。また、曲線運動を行っている物体では、その粒子は異なる速度で動いているに違いないので、それらの速度差が大きい場合には、それを考慮に入れる必要がある。

固定中心または軸回りに回転する物体：固定された中心または軸回りに回転する物体では、そのそれぞれの粒子はその中心軸回りの円内で運動し、中心からの距離が異なる位置にある粒子の速度は、その距離に応じて大きくまたは小さくならなければならない。

したがって、これに落下物体の法則を適用するには、そのような回転物体を構成する粒子を、中心からの距離が異なるために異なる速度で動くいくつかの小さな物体ごとに分割し、それらを集めたものと考えなければならない。そして、それらが回転体全体の一部を形成しているときの実際の速度となるためには、それぞれの物体にいくらのエネルギーつまりパワーを伝達しなければならないか、ということを求めることができる。そのように求められたすべてのパワーの合計が、全物体に伝えられなければならない総エネルギーつまり総パワーである。

4.12　一様断面の棒

回転物体の最も単純な場合は、一様寸法の真っ直ぐな棒がその一端を回転中心つまり軸として回転する場合である。それが回転されたとき、その一端は全く動かず、他端は円を描くであろう。

そのような棒にある速度の運動を与えるために伝達されるべきパワーを求める。その棒の長さは 20 インチであり、その重さは砲丸のような 10 個の等しい重さのボールに分割され、それがビーズの紐のように長さ 20 インチの細い真っ直ぐなワイヤーで通されて繋がれていると仮定する。このワイヤーは曲がることはなく、それ自体は重さがないと仮定する。その一端が運動の中心となり、一つのボールがそこから 1 インチの位置に置かれ、そこからボールは 2 インチごとに、中心からそれぞれ 3、5、7、9、11、13、15、17 および 19 インチの位置に置かれる (訳注：つまり、長さ 2 インチ幅の短棒に分割してその中央位置のボールで置き換える) ものとする。

この重りの集合体がスリングのように回転させられると、各ボールの中心は円を描き、このように描かれる 10 個の円の直径は、それぞれ 2、6、10、14、18、22、26、30、34 および 38 インチとなるであろう。ボールの集合体が毎分 114.6 回転 (訳注：毎秒 $1.91 = \frac{6}{\pi}$ 回転) するならば、各ボールはその円軌道上を、毎秒 1、3、5、7、9、11、13、15、17 および 19 フィートの速度で動くであろう。

(p.33) 各ボールが実際に動く速度に基づく高さは前述の規則により計算され、各ボールに含まれる質量を掛けると、その積は各ボールに伝達されるパワーとなり、それはすべての別々の質量にそれぞれの速度に基づく高さを掛けた共通の積であるので、これらの積の合計は、その実際の運動を生み出すために全集合体に伝達される力学的パワーとなるであろう (表 2)。

ボール集合体の先端つまりワイヤーの先端は、毎秒 20 フィートの速度で動き、その速度に基づく高さは 6.22 フィートである。ここで、その積の合計 20.711 を 6.22 フィートで割ることにより、これと同じパワーで毎秒 20 フィートの速度で直線上を運動させる質量として、ボール 3.3 個分 (つまり全体の $\frac{1}{3}$) の値を得る。これより、次の結論が導かれる。

表 2　棒の回転運動

速度 ft/s	落下高さ ft	各質量	力学的パワー
1	0.015	1	0.015
3	0.140	1	0.140
5	0.389	1	0.389
7	0.762	1	0.762
9	1.260	1	1.260
11	1.882	1	1.882
13	2.633	1	2.663
15	3.500	1	3.500
17	4.510	1	4.510
19	5.620	1	5.620
	計	10	20.711

真直で一様な棒またはレバーを、その一端を固定中心または軸としてその回りに回転させるために、それへ伝達されなければならない力学的パワー は、レバー先端が円運動する速度と同じ速度で直線運動させるために、その物質の重さの $\frac{1}{3}$ の質量に伝達されなければならないパワーに等しい。

規則：レバーの重さの $\frac{1}{3}$ にレバー先端が円運動する速度に基づく高さを掛けると、その積は伝達される力学的パワーである。

例：重さ 52.7 ポンドの鉄の丸棒または棒を仮定する。それは直径 2 インチ、長さ 5 フィートであり、レバーまたははずみ車の 1 本のアームのように軸から突き出て、毎分 35 回転するとする。そのレバーの先端は直径 10 フィート、つまり円周 (10 ×3.14 =) 31.4 フィートの円を描き、毎分 (31.4 ×35 回転 =) 1099.5 フィート、つまり (÷60 =) 18.32 フィート/秒 の速度で動く。この速度に基づく高さは 5.23 フィートであり[*23]、これに (重さの $\frac{1}{3}$ =) 17.57 ポンド を掛

[*23] この主題に関するすべての計算は、以下の規則により行うことができる。

(1) 回転する物体がその円軌道内で動く速度を見つけること。

規則：円の直径 (フィート) に毎分の回転数を掛けて 19.1 で割ると、その商が速度 (フィート/秒) である。

例：ある回転物体が直径 10 フィートの円軌道を描いて、毎分 35 回転すると仮定する。10 ×35 = 350 ÷19.1 = 18.33 フィート/秒 となる。

計算式 (訳注)：

$$(\text{周速度 [ft/s]}) = \frac{\pi \times (\text{直径 [ft]}) \times (\text{回転数 [rpm]})}{60\ \text{s/min}} = \frac{(\text{直径 [ft]}) \times (\text{回転数 [rpm]})}{19.1\ \text{s/min}}$$

(2) 物体が円周上を回転する速度に基づく高さを求めること。

規則：その円の直径 (フィート) に毎分の回転数を掛け、その積を定数 153.2 で割ると、その商の 2 乗は、物体がその円内で動く速度に基づく高さである。

例：上記の例では、円は直径 10 フィートであり、×35 回転/分 = 350、÷153.2 = 2.287 となる。その 2 乗は 5.23 フィートであり、以前示したように、これが求める高さである。

計算式 (訳注)：落下高さと周速度の関係式、周速度と回転数の関係式を順に用いて、

$$(\text{落下高さ [ft]}) = \left\{\frac{(\text{速度 [ft/s]})}{8.021}\right\}^2 = \left\{\frac{(\text{直径 [ft]}) \times (\text{回転数 [rpm]})}{19.1 \times 8.021}\right\}^2 = \left\{\frac{(\text{直径 [ft]}) \times (\text{回転数 [rpm]})}{153.2}\right\}^2$$

けて、伝達される力学的パワーとして 91.8 ポンド フィート を得る。

(p.34) レバーの端が軸に達していない場合は、まず、中心に到達していたとして考えて、その後、欠けている部分の効果を求めて差し引かなければならない。

例：長さ 2.5 フィートで重さ 26.35 ポンドの一様な棒が、その一端が運動中心から 5 フィート離れ、他端が 2.5 フィート離れて、毎分 35 回転すると仮定する。前記の場合は、運動中心まで届く長さ 5 フィートの棒の計算であり、今回の例では、長さ 2.5 フィートで重さ 26.35 ポンドだけの他のレバーを計算しなければならない。その先端の速度は毎秒 9.16 フィートであり、この速度に基づく高さは 1.3075 フィートである。これに 8.783 ポンド (重さ 36.35 ポンドの $\frac{1}{3}$) を掛けて、そのパワーとして 11.47 ポンド・フィートとなる。長さ 5 フィートのレバーのパワー 91.8 ポンド・フィートからこの値を差し引くと、80.33 ポンド・フィートとなり、これが問題の棒に伝達される力学的パワーである。

注意：この計算は、以下の原理に基づいて要約することができる。

長さが異なるが同じサイズで均一密度の真っ直ぐなレバーを、その一端を固定中心つまり軸として同じ周期で回転させるために、それらに伝達しなければならない力学的パワーは、その軸からそれぞれの他端までの距離の 3 乗に比例する*24。

レバー全体に伝達されるパワーのうち、一様なレバーの回転中心部分 (つまり棒全長のうち回転軸に繋がる一部分) に伝達される力学的パワーの比率を求める。

規則：レバー全体の長さをその回転中心部分の長さで割り、その商を 3 乗する。そして、レバー全体に伝達されるパワーを、その 3 乗値で割ると、その商はその中央部分によるパワーである。

例：レバー全長 5 フィート ÷中央部分長さ 2.5 フィート ＝ 2 、その 3 乗は 8 である。前述のように 5 フィートのレバー全体のパワーは 91.8 ポンド・フィートであり、中心から 2.5 フィート伸びた棒またはレバーに伝達されなければならない力学的パワーは、91.8 ÷8 ＝ 11.475 ポンド・フィートとなる。

注意：上記のすべての比率は、長さに対して小さい断面で非常に細い一様断面のロッドまたは棒に対するものである。しかし、これは軸つまり運動中心から垂直に突き出たほとんどすべての種類のレバーまたはアームに対し、目に見えるほどの誤差なく使用できるであろう。

レバーの一方の端が他方より大きくて重い場合、同じ重さではないボールの集合体の仮定を用いて繰り返さなければならないが、各ボールの質量を適切に定めて、上述の場合のようにその速度に基づく高さを掛ければ、どんな場合でもその規則を適用することができる。

真っ直ぐな一様な棒またはレバーの回転半径を求める。このためには、上述のボール集合体に置き換えた考察に再度戻

---

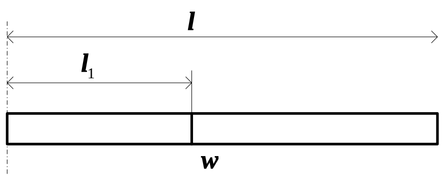
*24 (訳注)

右図のように、単位長さあたり重さ w で、長さ l の棒を、その左端を中心として、鉛直軸回りに毎分 n 回転するものとする。その時の運動エネルギーは

$$P = \frac{1}{2g}\left(\frac{wg}{3}\right)\left(\frac{2\pi ln}{60}\right)^2 = \frac{\pi^2 wn^2 l^3}{173700} \propto l^3, \quad g = 32\frac{1}{6}\ \mathrm{ft/s^2}$$

ただし、$[w]$ =lb/ft、$[l]$ = ft、$[n]$ = rpm とする。

長さが l の棒のうちの長さ l_1 の部分の運動エネルギーは



$$P_1 = \frac{{l_1}^3}{l^3} P$$

であるので、回転軸から l_1 だけ離れた長さ $l_2 = l - l_1$ の棒が同様に回転するときの運動エネルギーは次式となる。

$$P_2 = P - P_1 = \left(1 - \frac{{l_1}^3}{l^3}\right) P$$

らなけらばならない。もし、力学的パワーの合計 20.711 を全質量 10 で割れば、伝えられた全パワーを及ぼすために全質量が降下しなければならない高さとして、2.07 フィートが得られる。その高さによる速度は 11.55 フィート/秒であり、それは、ボール集合体の先端が円軌道で動く速度 (毎秒 20 フィート) の、(11.55 ÷20 =) 0.577 倍の速度の速度である。これより、次のような結論を導き出すことができる。

まっすぐで均一な棒またはレバーの一端を固定中心または軸として、それを回転させるために伝達されなければならない力学的パワーは、レバーの先端が円内を動く速度の 0.57735 倍の速度で、等しい重さの物質を直線運動させるのに伝達されなければならないパワーと等価である。

運動中心からその速度で動く回転レバー上の点 (centre of gyration) までの距離は、回転半径と呼ばれる。

その一端を中心軸としてその回りを回転する一様なレバーでは、回転半径はその全長の 0.57735 倍となる。

規則：レバーの全長に 0.57735 を掛けると、それは運動中心からの回転半径を与えるであろう。それはレバーの全長のほぼ $\frac{52}{90}$ である[*25]。

例：長さ 5 フィートのレバーでは、回転半径は運動中心から (5 フィート ×0.577 =) 2.88 フィートである。

(p.35) **計算式 (訳注)：**

$$(\text{回転半径 [ft]}) = 0.577 \times (\text{レバー全長 [ft]})$$

延長線上の点を中心に回転する、真っ直ぐで一様な棒の回転半径を求めること。その運動中心から棒の両端部までの各距離が与えられているとして、そこからの回転半径を求める。

規則：両端部の距離の 3 乗の差を、これらの距離の差の 3 倍 (つまり棒の長さの 3 倍) で割ると、その商の平方根は軸からの回転半径である。

例：長さ 5 フィートの真っ直ぐで一様な棒を仮定する。その一端は軸から軸から 10 フィート、他端は 5 フィートの距離にあるとする。10 フィートの 3 乗 (つまり 1000) と 5 の 3 乗 (つまり 125) の差は 875 である。これを棒の長さの 3 倍である 15 で割ると、その商は 58.33 となり、この平方根 7.637 フィートが軸からの回転半径である。

計算式 (訳注)：物体の微小部分の質量を dm 、軸からの距離を r とすると、回転半径 $\overline{r}$ は次式で表される。

$$\overline{r}^2 = \frac{\int r^2\ dm}{\int\ dm}$$

$dm \propto dr$ であるので、棒に沿う座標の $r_A \sim r_B$ で積分して

$$\overline{r}^2 = \frac{\int_{r_A}^{r_B} r^2\ dr}{\int_{r_A}^{r_B}\ dr} = \frac{{r_B}^3 - {r_A}^3}{3(r_B - r_A)}$$

これより

$$(\text{回転半径}) = \sqrt{\frac{(\text{一端 } B \text{ までの距離})^3 - (\text{他端 } A \text{ までの距離})^3}{3 \times [(\text{一端 } B \text{ までの距離}) - (\text{他端 } A \text{ までの距離})]}}$$

レバー上の任意点を運動中心つまり軸とした真直で一様なレバーの回転半径を求めること。回転軸から見て、レバーは一方へ伸びる短いアームと反対方向へ伸びる長いアームで構成される。各アームの先端から軸までの距離を与えて、軸からのそれらの共通の回転半径を求めるものとする。

規則：各アーム端までの距離の 3 乗の合計を、それらの距離の合計の 3 倍で割ると、その商の平方根が回転半径である。

例：長さ 21 フィートのレバーまたははりを想定し、一方の端から 14 フィート、他方の端から 7 フィートの位置の軸が支えられている。14 フィートの 3 乗 (= 2744) に 7 フィートの 3 乗 (= 343) を加えると 3087 となり、これを 63 (14 フィートと 7 フィートの和 21 の 3 倍) で割ると、その商は 49 であり、この平方根 7 フィートが運動軸からの回転半径である。

計算式 (訳注)：棒に沿う座標の $-r_A \sim r_B$ で積分して

$$\overline{r}^2 = \frac{\int_{-r_A}^{r_B} r^2\ dr}{\int_{-r_A}^{r_B}\ dr} = \frac{{r_B}^3 + {r_A}^3}{3(r_B + r_A)}$$

[*25] (訳注) 正確には $1/\sqrt{3}$ となる。

これより

$$(回転半径) = \sqrt{\frac{(一端\ B\ までの距離)^3 + (他端\ A\ までの距離)^3}{3 \times [(一端\ B\ までの距離) + (他端\ A\ までの距離)]}}$$

共通の軸つまり運動中心まわりに回転する複数のアームを持つレバーの、共通の回転半径を求めること。もし、レバーのアームがすべて等しければ、それらの回転半径は同じ大きさになるであろう。しかし、各アームの回転半径が等しくなければ、各アームのすべての重さを回転中心に集めたと仮定し、それらの共通の回転半径を求めなければならない。最初に与えた一般的規則 (p.30) についての、以下の記述を用いることができる。

規則：各アームの重さに軸からの回転半径の 2 乗を掛け、その積のすべての合計をすべてのアームの重さで割ると、その商の平方根が共通の回転半径となるであろう。

例：あるレバーは共通の軸から始まる一様な太さの 3 本のアームを持ち、その一本は重さ 2 ポンドで軸からの長さ 17.32 インチであり、他の一本は重さ 4 ポンドで長さ 10.38 インチで、残る一本は重さ 6 ポンドで長さ 6.92 インチであるとする。結果は、p.30 で記述した 3 個の砲丸の例と同様の求めることができる。

計算式 (訳注)：

$$回転半径\ \bar{r} = \sqrt{\frac{\sum_i {r_i}^2 m_i}{\sum_i m_i}} = \sqrt{\frac{17.23^2 \times 2 + 10.38^2 \times 4 + 6.92^2 \times 6}{2+4+6}} = 11.525\ \mathrm{in}$$

すべてのレバーの断面が同一形状である場合は、レバー質量が長さに比例し ($m_i \propto l_i$)、${r_i}^2 = {l_i}^2/3$ であることより、上の式は

$$回転半径\ \bar{r} = \sqrt{\frac{\sum_i {r_i}^2 m_i}{\sum_i m_i}} = \sqrt{\frac{\sum_i {l_i}^3}{3\sum_i l_i}}$$

となり、前記の結果に一致している (訳注終わり)。

4.13 回転円板

次に簡単な回転物体のケースは、砥石や石臼のように、その中心を通る軸まわりに回転する中実の車輪つまり円板の場合である。

物体をある速度にするために、物体に伝達しなければならないパワーを決定する。一様な密度と厚さの、直径 40 インチの中実の円板を仮定する。そのとき、その重さはその面積に比例する。毎分 114.6 回転するとすると、その円周は毎秒 20 フィートで移動する。

今、車輪は、金属製の箍 (たが) のような 10 個のリングで構成されていると考える。10 個のリングは、それらの間にかなりのスペースを残して、等間隔で互いに同心円状に配置され、全体で回転する車輪と同じ重さになるものする。これらのリングはそれぞれ直径 2、6、10、14、18、22、26、30、34 および 38 インチである (訳注：つまり、2 インチ幅のリングに分割してその幅の中央を通る円で置き換える) とし、それらは、変形せず重さもない小さい放射状のワイヤーにより強固に結合されていると仮定する。

(p.36) この質量が毎分 114.6 回の速度で回されるとき、各リングは、前の場合 (p.33) と同じ対応するボールと同じ速度で移動し、これを用いて前のケースと比較することができる (表 3)。両者の間の唯一の違いは、(前の例では) ボールがすべて同じ重さであったが、今回の同心円リングの重さは、円が大きくなるほど重くなることである。円の円周はその半径に比例するので、各リングに含まれる物質の質量は、その半径によりそれらの比を表すことができる。各リングが動く速度に基づく高さにそのリングに含まれる物質の質量を掛けると、その積は各リングに伝えられるパワーとなるであろうし、これらの積の合計は、それが実際に持っている運動をそれに与えるために、全集合体に伝えられるべき力学的パワーである。なぜならそれは、すべてのそれぞれの質量にそれぞれが動く速度に基づく高さを掛けた共通の積であるからである。直径 40 インチの車輪の円周は、毎秒 20 フィートの速度で移動し、その速度にもとづく高さは 6.22 フィートである。積の合計の 309.9 を 6.22 フィートで割ると、同じパワーを加えて毎秒 20 フィートの速度で直線的に動かすことができる質量として、ほぼ 50 (つまり全質量の $\frac{1}{2}$) を得ることになる。これより次の結論が得られる。

表 3　円板の回転運動

速度 ft/s	落下高さ ft	各質量	力学的パワー
1	0.015	1	0.015
3	0.140	3	0.420
5	0.389	5	1.945
7	0.762	7	5.334
9	1.260	9	11.340
11	1.882	11	20.702
13	2.633	13	34.299
15	3.500	15	52.500
17	4.510	17	76.670
19	5.620	19	106.780
	計	100	309.935
			3.099

均一な厚さと密度の中実の車輪をその中心を通る軸まわりに回転させるために、それに伝達しなければならない力学的パワー は、車輪円周の周速度と同じ速度で直線運動させるために、その物質の重さの $\frac{1}{2}$ に伝達しなければならないパワーに等しい。

規則：回転する車輪の重さの $\frac{1}{2}$ に車輪円周が動く速度に基づく高さを掛けると、その積は伝達される力学的パワーである。

例：直径 4.375 フィートで重さ 3500 ポンドの砥石が毎分 270 回転すると仮定するとき、その運動を与えるためにはいくらのパワーが伝達されなければならないか ？

以前に与えられた規則 (p.33) により、その周速度は毎秒 61.83 フィートであり、この速度に基づく高さは 59.4 フィートであるので、その力学的パワーは、(重さの半分 1750 ポンド $\times$59.4 フィート $=$) 103950 ポンド・フィートである。

回転する車輪が完全な中実の円でなく、はずみ車のリムのようなリングまたは円環状である場合、まず、完全な円つまり中実の車輪と見なして計算し、その後に欠けている部分の影響を計算して取り除く必要がある。

例：鋳鉄製はずみ車のリムは外径 22 フィート、内径 20 フィートで、そのリムの厚さは 6 インチであり、毎分 36 回転すると仮定する。リムにその運動を与えるために、それにいくらのパワーを伝達しなければならないか？そのアームの重さは考慮から除外されているとする。

このリングの中の鋳鉄の質量 (体積) は 33 立方フィートである。なぜなら、直径 22 フィートで厚さ 6 インチの中実の車輪は 190 立方フィートであり、そこから直径 20 フィート (厚さ 6 インチ) の中実の車輪 (157 立方フィート) を差し引くと、リムだけの値として 33 立方フィートとなる。

今、直径 22 フィートの中実の車輪を想定すると、その物質量 (体積) は 190 立方フィートで、その円周の速度は毎秒 41.47 フィートであり、その速度に基づく高さは 26.8 フィートである。それに 95 立方フィート (つまり物質量の $\frac{1}{2}$) を掛けると、伝達されるパワーは 2546 立方フィート (鋳鉄)・フィートとなる。

また、直径 20 フィートの別の中実の車輪を想定すると、その物質量 (体積) は 157 立方フィートで、その円周の速度は毎秒 37.7 フィートであり、その速度に基づく高さは 22.1 ft である。それに 78.5 立方フィート (つまり物質量の $\frac{1}{2}$) を掛けると、パワーは 1735 立方フィート (鋳鉄)・フィートとなる。

これを全体の車輪によるパワー 2546 から差し引くと、811 立方フィート (鋳鉄)・フィート、つまり (×450 ポンド/立方フィート =) 364950 ポンド・フィートとなる。これが、問題の車輪のリムに毎分 36 回転の速度を与えるために、それに伝達されなければならない力学的パワーである。**注意：**この計算は、以下の原理に基づいて簡略化することができる。

(p.37) 同じ厚さ同じ密度で直径の異なる中実車輪を同じ周期で回転させるために、それらに伝達されなければならない力学的パワーは、それらの直径の 4 乗に比例する。

例：5 個の砥石があり、それらはすべて同じ厚さで同じ種類の石で構成され、直径がそれぞれ 1、2、3、4、および 5 フィートであるとする。1 分間に同じ回数だけ回転させるために、それぞれの砥石に伝達されなければならないパワーは、(1 ×1 ×1 ×1 =) 1、(2 ×2 ×2 ×2 =) 16、(3 ×3 ×3 ×3 =) 813、(4 ×4 ×4 ×4 =) 2561、および (5 ×5 ×5 ×5 =) 625 と表すことができる。

再度、上記の直径 20 および 22 フィートの想定した中実の車輪の場合では、それらに伝達される力学的パワーは 1735 および 2546 で表され、これら二つの数字の比率は、20 の 4 乗である 160000 と 22 の 4 乗である 234256 との比率と同じであることがわかるであろう。

この比率となるのは、以下の理由による。
I：そのような車輪の円周の速度は直径に比例すること。
II：運動する物体のエネルギーはその速度の 2 乗に比例すること。
III：そのような中実車輪の質量はその直径の 2 乗に比例すること。

中実の円形車輪の任意の中央部分に (つまり、大きい車輪内のより小さい車輪に)、**伝達しなければならない力学的パワーを見つけること。**全体の車輪に伝達されるパワーは与えられているものとする。
規則：全体の車輪の直径を中央部分の直径で割り、その商を 4 乗する。車輪全体に伝達されるパワーをこの 4 乗の値で割ると、その商が中央部分に伝達されるパワーを与える。
例：直径 22 フィート、厚さ 6 インチの鋳鉄製の中実の車輪を、毎分 36 回転させるために伝達されるパワーが、2546 立方フィート (鋳鉄)・フィートであるとき、その中に含まれる直径 20 フィートの中央部分つまりより小さい中実車輪には、いくらのパワーが伝達されねばならないか？

22 フィート ÷20 フィート = 1.1 であり、その 4 乗は (1.1 ×1.1 ×1.1 ×1.1 =) 1.464 である。そして 2546 立方フィート ÷1.464 より、中央部分に伝達されなければならないパワーとして 1735 立方フィート (鋳鉄)・フィートが得られる。

注意：上記の比率は、中心を通る軸回りに回転する一様厚さで一様密度の、すべての中実の円形車輪に当てはまる。

回転車輪の厚さや密度が一様ではない場合は、問題の回転車輪を表すために、適切な質量の円リングの集合体を仮定して再度行わなければならないそして各リングの質量にそれが動く速度に基づく高さを掛けて、上の規則はその特定の場合に適合させることができる。

中実の円形車輪の回転半径を求める。このためには、上述のリング集合体に置き換えた考察に再度戻らなければならない。積の合計 309.9 を質量の合計 100 で割ると、伝達されたすべてのパワーを発揮するために全質量が落下する高さとして、3.099 フィートを得るであろう。その高さに基づく速度は毎秒約 14.14 フィート、つまり、円周が動く速度 (毎秒 20 フィート) の (14.14 ÷20 =) 0.707 倍 (訳注：$1/\sqrt{2}$ 倍) である。これより、次の結論が得られる。

中実の円形車輪をその中心軸まわりに回転させるために、それに伝達されなければならない力学的パワーは、それに等しい重さの物質を、その車輪の円周速度の 0.7071 倍の速度で直線運動させるために伝達されな

ければならないパワーと同じである。

円周速度の 0.7071 倍となる速度で動く任意の点 (center of gyration) と運動中心との距離は、回転半径と呼ばれる。

(p.38) **注意：**この場合、無数の center of gyration が存在し、そのすべては運動軸から等距離にあり、一つの円周を形成するので、それは circle of gyration と呼ぶことができる。この円の直径はすべての場合において、中実車輪の直径の 0.707 倍となるであろう。

規則：中実車輪の直径に 0.7071 を掛けると、それは circle of gyration の直径を与えるであろう。

計算式 (訳注)：

$$(\text{回転半径}) = 0.7071 \times (\text{中実車輪の半径})$$
$$(\text{circle of gyration の直径}) = 0.7071 \times (\text{中実車輪の直径})$$

すべての中実車輪について、車輪の直径 (フィート) および毎分の回転数を与えて回転半径先端 (centre of gyration) の速度 (フィート/秒) を求める。

規則：車輪の直径 (フィート) に毎分の回転数を掛け、その積を 27 で割ると、その商は回転半径先端の速度 (フィート/秒) である。

例：直径 5 フィートで毎分 100 回転する石臼を仮定すると、5 フィート ×100 回転 = 500 、÷27 = 18.5 フィート/秒 となり、これが回転半径先端の速度である。

計算式 (訳注)：

$$(\text{回転半径先端速度 [ft/s]}) = 0.7071 \times \frac{\pi(\text{直径 [ft]}) \times (\text{回転数 [rpm]})}{60\ [\text{s/min}]} = \frac{(\text{直径 [ft]}) \times (\text{回転数 [rpm]})}{27.01}$$

円形リングつまり環状物体の回転半径。リングの外半径および内半径を与えて、その回転半径を求める。

規則：二つの半径の 4 乗の差をそれらの半径の 2 乗の差の 2 倍で割ると、その商の平方根が回転半径である。

例：あるリングは外半径 11 フィートで、内半径 10 フィートである。14641 (11 の 4 乗) と 1000 (10 の 4 乗) の差は 4641 であり、121 (11 の 2 乗) と 100 (10 の 2 乗) の差の 2 倍は (21 ×2 =) 42 である。そのとき、4641 ÷42 = 110.5 となり、その平方根 10.519 が回転半径である。

計算式 (訳注)：リングの内半径を r_1、外半径を r_2 とすると、その回転半径は次式で与えられる。

$$\overline{r}^2 = \frac{\int_{r_1}^{r_2} r^2\ dm}{\int_{r_1}^{r_2}\ dm} = \frac{\int_{r_1}^{r_2} r^2\ 2\pi r\ dr}{\int_{r_1}^{r_2} 2\pi r\ dr} = \frac{{r_2}^4 - {r_1}^4}{2\left({r_2}^2 - {r_1}^2\right)} \quad \left(= \frac{{r_2}^2 + {r_1}^2}{2} \right)$$

したがって、

$$\overline{r} = \sqrt{\frac{{r_2}^4 - {r_1}^4}{2\left({r_2}^2 - {r_1}^2\right)}} \quad \left(= \sqrt{\frac{{r_2}^2 + {r_1}^2}{2}} \right)$$

証明：このリングが毎分 35 回転するとき、回転半径の先端は直径 21.04 フィートの円を描き、その円内を毎秒 39.65 フィートの速度で動くであろう。この速度に基づく高さは 24.5 フィートであり、そして、リング内の物質の質量 (体積) が 33 立方フィートであるならば、そのエネルギーは (24.5 ×33 =) 808.5 立方フィート (金属)・フィートである。

注意：回転物体の重さに回転半径の先端の動く速度に基づく高さを掛けた量は、物体のエネルギー、つまりその運動を生じるために伝達されなければならない力学的パワーである。

回転する**種々の物体の回転半径** をまとめると、表 4 のようになる。

表 4　回転する種々の物体の回転半径

条件		基準	倍数
一端回りに回転する真直で一様な棒		棒の全長	×0.5773
その中心回りに回転する円板		円板半径	×0.7071
円板	その直径の一つを軸として回転	半径	×0.5
薄い円リング		半径	×0.7071
中実の球	その直径の一つを軸として回転	半径	×0.6325
薄い中空の球		半径	×0.8l64
その軸回りに回転する円錐		底円半径	×0.5477
その頂点回りに回転する直角円錐		円錐高さ	×0.866
その軸回りに回転する放物面		底円半径	×0.5773

4.14　振り子

振り子は、固定された支点から棒または紐で自由に吊り下げられて、支点回りの円弧内で自由に交互運動できるようにされた重い物体である。

(p.39) 振り子の物体 (重り) の自然の静止位置は、吊り棒または紐が鉛直のときである。物体の重心が支点の真下に正確に位置するときに、それは最も低くなるからである。

もし何らかの力の作用により振り子が鉛直位置から横へ引かれて動かされたとすると、その重心が上昇しなければならず、その結果、その撹乱力が作用しなくなると、振り子は重力の作用で鉛直線の方向へ戻って下がるであろう。鉛直線へ戻る間に円弧に沿って重心が降下することにより、動いている質量はかなりの運動エネルギーを獲得し、そしてこのエネルギーは、それが鉛直位置へ到達したときに破壊されたり打ち消されたりしないので、それは振り子を円弧の前方の鉛直線の反対側へ運ぶであろう。そしてその重心が上がってエネルギーを打ち消し、それがすべて消費されて、その結果その方向への動きが止まるであろう。残された振り子は、その重力により鉛直線に戻るであろう。しかし、そのように戻る間に降下して新たなエネルギーを獲得し、それは前と同様に円弧の前方へ行き過ぎるであろう。

このようにして振り子は、最初にそれに伝えられたパワーにより、鉛直線の両側に前後に振動して揺れ続ける。そしてもし、空気の抵抗と支点中心の摩擦がなかったならば、そのような振動運動は永遠に続くであろう。

振り子の運動は、重力と慣性の複合作用によって維持される。重力が振り子物体を鉛直線の方向へ動かし、その動きは最初は慣性により妨げられるが、その動きが徐々に作り出され、その獲得されたエネルギーが大きくなって、振り子を鉛直線を超えて反対側へ移動させて上昇させ、継続して作用する重力がそれを減速させてエネルギーを破壊し、そしてそれを引き戻す。

振り子として吊り下げられた物体が鉛直位置から移動されると、各粒子の重さが鉛直位置へ戻そうとする傾向は、支点から下ろした鉛直線とその粒子との水平距離に比例する。そしてすべての粒子の合力は、全重さとその鉛直線から重心までの水平距離との積で表すことができる。

この力によって円弧内を運動する質量は、各粒子の重さに運動中心からの距離の 2 乗を掛けたすべての積の合計により見積もられる。

振り子が (一方の端での) その静止状態からの他方の方向へ動いて、(他端で静止して) 反対方向へ戻り始めるまでの運動

は、**1 振動** (a vibration or an oscillation) と呼ばれる。そのような運動の経過時間は、**振動の時間**[*26]と呼ばれる。

単振子とは、吊り下げている棒または紐が曲がらず、重さがないと仮定でき、重りつまり振り子物体が数学的な点であると見なせる振り子である。支点からその重りの質点までの距離は、振り子の長さである。長くて細い髪の毛で吊るされた小さな鉛の砲丸は単振子の例であり、以下の性質を持つ[*27]。

I. ボールを吊るした振り子が円弧に沿って振動すると、ボールが最低点に達したときにボールが取得している速度は、その降下でボールが描いた弧の弦の長さに比例する。

II. ボールの運動をその円弧内で加速する力とその全重力との比は、鉛直線からボールまでの水平距離と振り子の長さとの比である。

III. 与えられた時間内に任意の振り子が行う振動の数は、振動が大きくても小さくても、ほぼ同じである。
注意：ボールがサイクロイドと呼ばれる曲線を描くとき、これは真実である。しかし、ボールが円弧を描いているときは、その弧が非常に短くて、サイクロイドと円との間に感知できるほどの差がなくならない限り、まったく正確というわけではない。

IV. 短い円弧に沿う振動の時間と、振り子の長さの半分の高さを物体が重力で落下する時間との比は、円周とその直径との比 ($\pi:1$) になる。

V. 異なる長さの振り子により所定時間に行われる振動の数は、その長さの平方根に反比例する。ただし、重力は同じであり続けるとする。

VI. 同じ時間内に振動する (振動数の等しい) 振り子の長さは、重力に比例している。

(p.40) **振り子が 1 振動する間に、物体が落下する高さを求めること。**振り子の長さは与えられているものとする。

規則：振り子の長さに 4.9348 を掛けると、それは、振り子が 1 振動する間に物体が落下する高さを与えるであろう。

例：真空中で 1 秒に 1 回 (周期 2 秒で) 振動する振り子の長さは 39.1386 インチである。それに 4.9348 を掛けると 193.141 インチとなり、これが物体が 1 秒間に真空中を落下する高さである (p.21 を参照)。

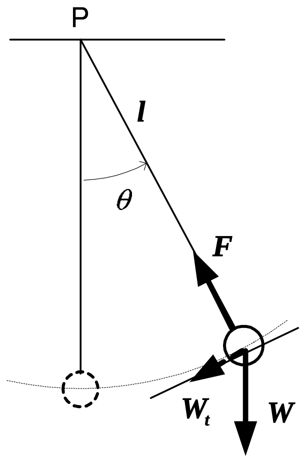
計算式 (訳注)：単振子の周期 T は $2\pi\sqrt{l/g}$ である。半周期 $T/2$ 間の物体の落下高さは

$$(\text{落下高さ}) = \frac{1}{2}g\left(\frac{T}{2}\right)^2 = \frac{\pi^2}{2}l = 4.9348\times l$$

---

*26 (訳注) 半周期に相当

*27 (訳注)



振り子の長さを l 、ボール (質点) の重さを W とし、任意の振れ角を θ とする。ボールに働く重力の円弧軌道接線方向成分は $W_t = W\sin\theta$ であり、同じ振り子では弦の長さ $2l\sin\theta$ に比例する (I)。

また、

$$\frac{W_t}{W} = \sin\theta = \frac{l\sin\theta}{l} = \frac{\text{円直線からボールまでの水平距離}}{\text{振り子の長さ}}$$

の関係がある (II)。

円弧軌道接線方向の運動方程式は $(W/g)l\ddot{\theta} = -W\sin\theta$ であり、$\theta << 1$ rad を仮定して、$\sin\theta \cong \theta$ と近似すると

$$l\ddot{\theta} + g\theta = 0$$

この振動の角振動数は $\omega = \sqrt{g/l}$ であり、振動の数 (振動数 f の 2 倍) は

$$2f = \omega/\pi = \frac{1}{\pi}\sqrt{\frac{g}{l}}$$

となる (III；ただし、原書の当時は経験的事実)。

振動の時間 (半周期) は $T/2 = 1/(2f) = \pi\sqrt{l/g}$ であり、高さ $l/2$ を自由落下する時間 T' は $l/2 = (1/2)gT'^2$ と表されるので、

$$\frac{T/2}{T'} = \frac{\pi\sqrt{l/g}}{\sqrt{l/g}} = \pi$$

となる (IV)。

振動数は $f = 1/(2\pi)\sqrt{g/l}$ より、振動の数 (振動数の 2 倍) は長さの平方根に比例し (V)、振動数が同じ振り子の長さは重力加速度の大きさに比例する (VI)。

となる。

1 分間に与えられた数の振動を行う振り子の長さを求めること。

規則：定数 375.36 を毎分の振動の数で割ると、その商の 2 乗は振り子の長さ (インチ) である。

例：毎分 60 回の振動を行うには 375.36 / 60 = 6.256 、その 2 乗は 39.138 インチであり、これが振り子の長さである。

または逆に、定数 375.36 を振り子の長さ (インチ) の平方根で割ると、その商は、振り子の毎分の振動の数である。

例：長さ 22 インチの振り子がある。22 の平方根は 4.69 であり、毎分の振動の数は 375.36 ÷4.69 = 80 となる。

計算式 (訳注)：$(\text{振動の数}) \times \sqrt{(\text{振り子の長さ})} = \text{const.}$ の関係があり、振り子の長さ 39.1386 インチのとき 1 秒間に 1 回振動するので、

$$(\text{振動の数 [rpm]}) \times \sqrt{(\text{振り子の長さ [in]})} = 60 \times \sqrt{39.1386} = 375.36$$

の関係が成り立つ (訳注終わり)。

ほとんどの場合、振り子の重さは一点に集中していない。例えば、吊り下げている棒がその重さのかなりの部分を占めるときや、あるいは、そのすべての重さがその棒に分配されているときなどである。このようなすべての場合では、振り子の有効長さは支点中心から 振動の中心 (center of oscillation) と呼ばれる仮想上の点まで測定される必要がある。その振動の中心とは、運動中心からの距離が対象とする振り子と同周期で振動する単振子の長さに等しくなる位置の点である。

振り子の振動の中心は、支点と重心とを通る直線上の点である。振り子の振動の中心とは、もし物体のすべての物質をその点に集めることができれば、そこに作用する任意の力は、すべての物質が元の場所にあるときに振り子の重心に同じ力が作用してある時間内でその物体に生じる角速度と同じ角速度を、その仮想の単振子に対して生じさせることができる点である。

物体の全重さはその重心に集中されていると考えることができ、重力はすべてその点に作用していると見なすことができる。振り子の物体の慣性もまた、以前に説明したように、すべてその回転半径の先端に作用すると考えることができる。これより、振り子物体の振動の中心の位置は、その回転半径および重心と、ある一定の関係を有する。つまり、回転半径は、運動中心から振動中心までの距離と重心までの距離との比例中項 (幾何平均) である。これより、以下の規則が得られる。

振り子の運動中心からその振動の中心までの距離を求めること。回転半径と運動中心から重心までの距離とを与えるものとする。

規則：回転半径の 2 乗を重心までの距離で割ると、その商は振動の中心までの距離である。

例：長さ 20 インチの真っ直ぐで均一な棒がその一端で吊り下げられているとき、回転半径は運動中心から 11.55 インチの長さであり (p.34 を参照)、重心は運動中心から 10 インチの位置である。11.55 の 2 乗は 133.3 であり、÷10 = 13.33 インチとなる。これが支点から振動の中心までの距離である。それは全長の (13.3 ÷20 =) 0.66、つまりちょうど $\frac{2}{3}$ に位置している。もし回転半径が未知であれば、次の規則に従えばよい。

規則：振り子の物体の各粒子の重さに運動中心からの距離の 2 乗を掛けて、これらすべての積の合計を、すべての重さの合計に運動中心から重心までの距離を掛けた積で割る。その商は振動の中心までの距離である。

例：左端を支点とした重さ 10 ポンドの真っ直ぐな棒が 10 個の等しい砲丸で表されるとし、長さ 20 インチのワイヤーに 距離 1、3、5、7、9、11、13、15、17、および 19 インチの位置に通してつながれていると仮定する。これらの距離の 2 乗は 1、9、25、49、81、121、169、225、289、361 となり、各砲丸の重さ 1 ポンドを掛けた積も同じ数値であり、その合計は 1330 となる。

運動中心から重心までの距離は 10 インチであり、それに重さ 10 を掛けると 100 となる、そして最後に、1330 ÷100 = 13.3 インチとなり、これが運動中心から振動の中心までの距離である（前述と同じ)。

計算式 (訳注)：質量 m の剛体振子において、支点回りの慣性モーメントを J、支点から重心までの距離を r_G とし、回転角を θ、重力加速度を g とするとき、その運動方程式は次式である。

$$J\ddot{\theta} + mgr_G\theta = 0$$

また、振り子の長さ l の単振子の運動方程式は、次式である。

$$l\ddot{\theta} + g\theta = 0$$

両者が等価である (同一に振動する) ためには

$$(\text{角速度})^2 = \frac{mgr_G}{J} = \frac{g}{l}$$

でなければならない。したがって、等価な単振子の長さ (振動の中心までの距離) は

$$l = \frac{J}{mr_G} = \frac{m{r_R}^2}{mr_G} = \frac{{r_R}^2}{r_G}$$

これより、回転半径は、支点から重心までの距離と振動中心までの距離の幾何平均であること (${r_R}^2 = r_G \times l$) がわかる。

また、物体が複数の質点で構成されていれば、$J = m{r_R}^2 = \sum_i m_i {r_i}^2$ であるので、

$$l = \frac{\sum_i m_i {r_i}^2}{mr_G}$$

として振動中心までの距離が求まる (訳注終わり)。

(p.41) この方法により、規則的な形の任意の物体の振動の中心を見つけることができる。以前 (p.33) に回転半径を求めるために示したのと同じようにして、互いにつなぎ合わされた多数のボールまたは質量で構成された、類似の物体を想像するだけでよいのである。

振り子の重心からの振り子の振動の中心までの距離を見つけること。

規則：振り子の各粒子の重さに重心からの距離の 2 乗を掛けて、これらすべての積の合計を、物体の全重さに重心と運動中心との距離を掛けたもので割る。その商は重心からその真下の振動の中心までの距離である。

例：以前の例のように、長さ 20 インチのワイヤーに通された 10 本の等しい砲丸を仮定する。その重心はその長さの中央になり、各砲丸の中心は、その両側にそれぞれ 1、3、5、7 および 9 インチの距離になるであろう。これらの距離の 2 乗は、重心の片側に 1、9、25、49 および 81 となり、反対側も同じとなる。各砲丸の重さは 1 であるので、それぞれの積も同じ数字で表わされ、それらの合計は 330 である。運動中心と重心と間の距離は 10 インチであり、×重さ 10 ポンド = 100 となる。そして最後に、330 ÷100 = 3.3 インチとなり、これが重心からその下方の振動の中心までの距離となる。重心は運動中心から 10 インチの距離にあるので、振動の中心は、以前と同じく運動中心から (10 + 3.3 =) 13.3 インチの位置である。

計算式 (訳注)：ある物体の重心を通る軸回りの慣性モーメントを J_G とすると、重心から距離 r_G だけ離れた元の軸に平行な新たな軸回りの慣性モーメント J は、$J = mr_G + J_G$ である。したがって、新しい軸を支点とした振り子の振動の中心までの距離 l は

$$l = \frac{J}{mr_G} = \frac{m{r_G}^2 + J_G}{mr_G} = r_G + \frac{J_G}{mr_G}$$

つまり、振動の中心は、重心の $J_G/(mr_G)$ だけ下方に位置している (訳注終わり)。

一端で吊り下げられた一様な棒において、その振動の中心は運動中心から棒全長の $\frac{2}{3}$ の位置となる。または、同じ棒をその全長の $\frac{1}{3}$ を運動中心の上方とし、$\frac{2}{3}$ をその下方とするように吊り下げるならば、振動の中心はその下端となり、その結果、棒は上端で吊り下げられたときと同じ周期で振動するであろう。

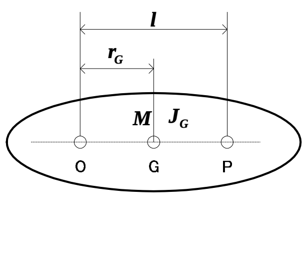
振動の中心と運動の中心は相反的である。なぜなら、任意の点で吊り下げられてその点の回りに振動する物体が、逆にされてその振動の中心で吊り下げられたならば、最初吊り下げられていた支点は振動の中心になり、そして両位置での振動は同じ周期で振動するからである[*28]。この性質を用いて、任意の不規則物体の振動の中心を実験的に決定することができる。その物体を任意の点で吊るしたとき所定時間内の振動数を確認し、そしてその物体を逆にして別のある点で吊るして、試行を繰り返すことにより、元の振動数と同じになる点を見つける。そのように見つかった 2 点間の距離は、同じ周

[*28] (訳注) 振動中心と運動中心の相反性について。

右図のような質量 M で重心 G まわりの慣性モーメント J_G の物体を考え、その任意点 O を支点とした剛体振子を考える。そのときの振動中心 P は OG の延長線上にあり、次式で与えられる。

$$l = \frac{J}{r_G M} = r_G + \frac{J_G}{r_G M}$$

ただし、$J = {r_G}^2 M + J_G$ は運動中心 O まわりの慣性モーメントである。(次ページへ)



期で振動する単振子の長さである。キャプテン・ケイター (Kater) が、毎秒 1 振動する振り子の長さが 39.1393 インチであることを決定したのは、この原則に基づいていた[*29]。

例：長さ 58.709 インチの一様なサイズと重さのロッドまたは棒が、その一端で吊るされていると仮定する。その棒は、振動の中心が運動中心から棒全長の $\frac{2}{3}$ つまり 39.1393 インチの位置にあるので、1 秒に 1 振動行う[*30]であろう。その棒を反転させて、その振動の中心で吊り下げると、その全長の $\frac{1}{3}$ は運動中心の上方、$\frac{2}{3}$ はその下方となるが、それは、最初の場合とまったく同じ周期で振動するであろう。

4.15 回転振り子または遠心振り子

回転振り子または遠心振り子は、ある固定点から紐または棒で吊るされて鉛直軸を中心に回転して水平の円を描くようにされた重いボールである。それは、吊り下げている紐や棒がその回転の間で円錐の表面を描くので、円錐振り子とも呼ばれる。

そのような振り子では、回転するボールの遠心力がボールを鉛直軸から離して、吊り下げている棒を鉛直線からの角度を大きく広げようとするが、重力がそのボールを鉛直軸に引き寄せようとする。振り子のボールが、それが描く円内で一様な速度で動かされるならば、これらの競合する力が一定の平衡状態を保ち、それによってボールは鉛直軸から一定の距離を保つであろう。回転運動の速度が増加するとボールの遠心力が増加し、その重力の作用とのつり合いに打ち勝って、ボールを鉛直軸から遠ざけて、より大きな円を描くようにするであろう。しかし鉛直軸から遠ざかると重力の作用も増加し、その作用は増加した遠心力とつり合って、ボールは鉛直軸からの新たな距離を保持して、その回転運動に別の変化が起こるまでそのより大きな円を描き続けるであろう。また、速度が低下した場合には、その重力の作用は減少した遠心力を上回り、ボールは鉛直軸に近づいて、より小さい円を描くようになるであろう。蒸気機関の回転速度を調整するための**調速機** (ガバナー) と呼ばれる装置は、この原則に基づいて構築されている。

(p.42) ヤング博士は、遠心振り子の運動は互いに直角方向に同時に生じる二つの異なる単振子の振動を合成したもの、と考えることができると述べている。一つの単振子が南北方向へ振動させるような力の作用を受ける一方で、単独で動作するならば東西方向へ振動させるような力の作用を、同時に受けている。そして、二つの力は大きさは等しく、互いに直角方向へ作用するとすると、振り子のボールに対するそれらの組み合わさった作用は、ボールを鉛直軸から一定の水平距離に保ち、吊り下げ点の真下に一定の鉛直距離を保った水平面内の円に沿って、一様な速度で回転運動させる。

遠心振り子の一回転は、回転するボールの中心によって描かれる円の平面の上方の支点の、鉛直高さに等しい長さの単振子の 2 振動と同じ時間内に行われる。言い換えると、円錐振り子の回転周期の半分は、吊り下げ棒により描かれる円錐の高度に等しい長さの、単振子の 1 回の振動の時間に等しい。その結果、遠心振り子の

振り子の支点を点 P に変更すると、新たな支点と重心間の距離は $r'_G = l - r_G$ となるので、上の関係を r'_G を用いて表すと、

$$r'_G = \frac{J_G}{(l - r'_G)M} \qquad \text{または} \quad l = r'_G + \frac{J_G}{r'_G M}$$

となり、振り子の長さが同一となる。つまり、同一周期で振動することになる。

当時は、このことは経験的に知られていたものと思われる。

[*29] 秒振り子 (周期 2 秒の振り子) の長さは、George Shuckburg の 真ちゅう製標準スケールの 30.1386 インチであると明記されている (p.22 および 40)。その条項が印刷されて以降、1760 年に製作された真ちゅう製の標準尺度を真の尺度原器として宣言する議会法が可決され、それは、現在 Imperial Standard Yard と呼ばれている。秒振り子は、この Imperial Standard Yard の 39.1393 である。

[*30] (訳注) つまり周期 2 秒

回転周期は、振り子の長さやボールが描く円の大きさにより決まるものではなく、その円の平面の上方の吊り下げ点の鉛直方向の高さにより決まるのである[*31]。

遠心振り子のボールの中心により描かれる円の直径を求めること。振り子が行う毎分の回転数と、ボールの中心から吊り下げ点までの長さ (インチ) を与えるものとする。

規則：定数 187.68 を毎分の回転数で割ると、その商の 2 乗は、ボールの中心が描く円の平面から吊り下げ点までの鉛直方向高さ (インチ) である。それから、その円の半径を見つけるために、回転する振り子の長さ (インチ) の 2 乗から、その鉛直方向高さ (インチ) の 2 乗を差し引くと、その差の平方根がボールの中心により描かれる円の半径 (インチ) である。その半径の 2 倍が直径である。

例：吊り下げ点からボールの中心までの長さを 28 インチとし、そしてその遠心振り子は毎分 37 回転するものとする。187.68 ÷37 回転 = 5.07 であり、その 2 乗 = 25.7 インチが鉛直高さ、つまり円錐の高さである。この 2 乗は 660.5 であり、また長さ 28 インチの 2 乗は 784 である。784 から 660.5 を引くと残りは 123.5 であり、この平方根は 11.1 インチで、これがボールの中心により描かれる円の半径である。つまり直径は 22.2 インチである。

計算式 (訳注)：前の訳注の結果より毎分の回転数を n とすると、

$$l\cos\phi = g\left(\frac{T}{2\pi}\right)^2 = g\left(\frac{60}{2\pi n}\right)^2$$

つまり、

$$(\text{回転円錐高さ [in]}) = (386\ \text{in/s}^2) \times \left(\frac{60}{2\pi \times (\text{回転数 [rpm]})}\right)^2 = \left(\frac{187.61}{\text{回転数 [rpm]}}\right)^2$$

また、

$$\begin{aligned}(\text{回転円直径 [in]}) &= 2l\sin\phi = 2\sqrt{l^2 - l^2\cos^2\phi}\\ &= 2\times\sqrt{(\text{遠心振り子長さ [in]})^2 - (\text{回転円錐高さ [in]})^2}\end{aligned}$$

(訳注終わり)

(p.43) 多くの場合、回転振り子の効果を単振子と比較するのではなく、ボールの遠心力から計算するのが便利である。なぜなら、吊り下げ点が常に鉛直回転軸と一致するとは限らないからである。これは蒸気機関の調速機の場合によくあることであり、その場合は吊り下げ点は固定した運動中心ではなく、それは鉛直軸を中心とした小さな水平の円を描くため、吊り下げている棒は完全な円錐ではなく、円錐台を描く。ボールが、それ自身の重力によって、鉛直軸に向かってどのような傾向で近づかねばならないかを見つけて、それを求心力として考慮すれば、私たちはそれを元に (p.28 で与えられた規則を逆に用いて)、その遠心力がその求心力に対抗してつり合うためには、そのボールにどのような円運動の速度を与えるべきかを計算することができる。

[*31] (訳注) 遠心振り子の回転周期について。

原著ではこの根拠は述べられていないが、以下のように考えればよい。

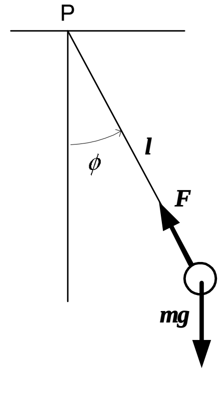
右図のように質量 m で長さ l の遠心振り子を回転させて、円錐角 2ϕ の円錐を描くように運動しているとする。円運動の角速度を ω とすると、ボールに働く水平方向および鉛直方向の力のつり合いより、

$$F\sin\phi = m(l\sin\phi)\,\omega^2$$
$$F\cos\phi = mg$$

これより、円運動の周期 T は

$$T = \frac{2\pi}{\omega} = 2\pi\sqrt{\frac{l\cos\phi}{g}}$$

となる。これは長さ $l\cos\phi$ の単振子の周期に等しい。



ボールがその吊り下げ点を通る鉛直線に向かって接近しようとする力とボールの重力との比は、ボールの中心からその鉛直線までの水平距離と、ボールの中心から吊り下げ点までの鉛直方向の高さとの比に等しい。したがって、その水平距離をその鉛直高さで割ると、その商は、ボールの自重を 1 として表した (a) ボールの求心力である。例えば、上記の場合、水平距離 11.1 インチ ÷鉛直高さ 25.7 インチ = 0.432 となり、遠心力はボールの重さの 0.432 倍である。

こうして求心力が求まると、同等の遠心力を生み出すために必要な回転速度は、p.28 の (回転速度から遠心力を求める) 規則を逆に用いて求めることができる。つまり、ボールの自重を 1 とした求心力に定数 (5870 ×12 =) 70440 を掛け、その積をボール中心が描く直径 (インチ) で割ると、その商の平方根は毎分の回転数である。

例：ボールの求心力が自重の 0.432 倍であり、ボールの中心は直径 222 インチの円を描くと仮定すると、70440 ×0.432 = 30430、÷直径 22.2 インチ = 1370 、その平方根 37 が毎分の回転数である。以前の方法の際に述べたのと同じ結果である。

計算式 (訳注)：p.28 の式

$$(\text{求心力}) = (\text{重さ}) \times \frac{(\text{直径 [ft]}) \times (\text{回転数 [rpm]})^2}{5868}$$

で 直径 [ft] = (直径 [in])/12 と置き直して、

$$(\text{回転数 [rpm]}) = \sqrt{\frac{70440 \times (\text{求心力})/(\text{重さ})}{\text{直径 [in]}}}$$

(p.44) このようにして求心力が遠心力とは別に計算されるときは、軸に接近させるように作用する力として、ボールの自重の他に任意の力を考慮に入れることができる。つまり、吊り下げている棒やそれに接続されている部品の重さ等。そのような場合、追加の力はボールの重さに対する比率で表して、前述の方法で決定されたように、ボール自体の求心力に加えなければならない。

回転振子の吊り下げ棒が鉛直位置からある角度だけ広がるように指定された場合は、定数 70440 にその角度の正接 (訳注：つまり 求心力/重さ の比) を掛けた値が、このような場合の適切な定数となる。以下の二つの場合が最も一般である。

遠心振り子の吊り下げ棒が鉛直線に対して 30 度の角度をなすように、任意の円内をボールが回転する速度を求めること。

規則：定数 $(70440 \times \tan 30$ 度 $=)$ 40670 をボールの中心が描く円の直径 (インチ) で割ると、その商の平方根はボールが毎分行う回転数である。

例：ボールの中心が直径 30 インチの円を描くとすると、40670 ÷30 = 1355.66 であり、その平方根より回転数は毎分 36.8 回転である。

吊り下げ棒が鉛直線に対して 45 度の角度をなす遠心振り子の回転速度を求めること。この場合、求心力はボールの重さに等しくなるので、その規則は p.29 と同じでなければならない。

規則：定数 70440 を円の直径 (インチ) で割ると、その商の平方根はボールが毎分行う回転数となる。

注意：遠心振り子に関する上記のすべての規則では、ボールだけの作用が考慮されていて、吊り下げ棒は重さがないと仮定されているが、棒の重さやそれに繋がれた他の部品の重さがボールの重さに比べて無視できないときは、同等の処置がなされなければならない。

5 力学的パワー

力学的パワー (mechanical power) は、すべての機械がそれから構成されている単純な要素のことであり、通常 6 種類のもの、つまり、てこ、輪軸、プーリ、斜面、ねじ、およびくさびから成るとされている[*32]。現代の発明物として他に二つのものある。これらすべては実体的な作用因 (material agent) であり、それを介して、対抗する力または反対向きの力同士が互いに作用し合う。単純な力学的パワーは、共通の目的を達成するために協調して作用するに、組み合わせて用いられ、このような組み合わせは普通、機械と呼ばれている。

力学的パワーは原動機の力を伝達して、その力の作用を打ち勝つべき抵抗に振り向けるために使用される。挿入された力学的パワーの役割は、原動機が作用する力を増倍させて、より大きな抵抗力に打ち勝つことができるようにすることであり、または、原動機の動きを増加させて、それをより長い区間に渡って抵抗力に作用させることである。また場合によっては、単に原動機の作用する方向を変えて、打ち勝つべき抵抗の方向に適した新しい方向へ伝達するために、力学的パワーが導入されることもある。

(p.45) したがって、力学的パワーは、与えられた力を必要な強さになるまで蓄積するための器官であり、それにより、与えられた力を及ぼして生じる運動が任意の必要な目的に適するように、その力の速度と方向を変更する。任意の力学的パワーに伝達される力を表現するのに、**パワー (power)** という用語を用い、力学的パワーが対抗して打ち勝つべき対抗する力を表すのに、**荷重 (weight)** または**抵抗 (resistance)** という用語を用いるのが普通である。

力学的パワーは常に運動を伝達するのに必要というわけではない。多くの場合、原動機のパワーと荷重との間にある種の力学的パワーを挿入して、それらの間に静的なつり合いを作り出すためにだけ必要とされる。

原動機により伝えられる力または動きを増大する手段として力学的パワーおよびそれらのさまざまな組み合わせを考慮する際に、パワーと荷重との間にそれに応じて元の動きを減少させない限り、伝達する力を増加させることはできないし、また、結果として生じる運動はそれに応じて元の力を減少させない限り大きくすることはできない。このことを、常に心に留めておかなければならない。その結果、力学的パワーをどのように用いても、駆動力 (moving force) つまり力学的パワーの量を増やすことはできない。これは p.16 で定義されているとおりである。力学的パワーの最大の効果は、それに伝達される駆動力を力と運動の構成要素に分解して、それらを新しい駆動力に再構成することであり、新しいこれらの要素は、その比率は元とは異なるが量は同じとなる。

任意の力学的パワーに伝達される力にそれが作用する距離を掛けて得られる積は、すべての場合で、重さまたは抵抗に力学的パワーの作用により移動した高さまたは距離を掛けた積に等しくなる[*33]。これは基本的な保存量であり、力学的パワーの特性を考える際に決して見落としてはならず、「力で得られるものはすべて距離で失われる」という格言により、記憶されるべきである。力の増大に関する以下の理由が理解されるとき、この格言が真実であることが明確になるであろう。

すべての力学的パワーは、ある固定して動かない支持を用いて動作し、その支持で対抗する抵抗力の一部を支えて、可

[*32] (訳注) ここの力学的パワーは、後世の「動力を伝える機械要素」を意味している。別の多くの箇所では、力学的パワーは「仕事率 (動力)」そのものの意味でも用いられている。

[*33] これは、力学的パワーが摩擦なしで作用することを前提としているが、実際には、それを伝達または補正する際に用いられるすべての力学的パワーにより、その可動部分の摩擦の結果として常に駆動力が失われる。そして複雑な組み合わせでは、摩擦による損失は、適用される全パワーの非常に大きな割合を占めている。

動部位に加わらないようにされている。その結果、残りの一部の抵抗力に対してだけ、可動部位に伝えられる駆動力が、その全ての効果を伴って作用することになる。しかし、この方法により固定支持に加えられた一部の抵抗力は、何の運動もしないのは明らかである。その結果、大きい抵抗力に対して小さい駆動力で打ち勝つことができるが、その運動の一部だけが対抗する大きい抵抗力に伝達されるために、この効果は、小さい駆動力に比例した大きい運動という犠牲により達成される。

力学的パワーにより速度を増加させることは、同じ比率を逆にしただけである。短い距離で作用する駆動力が可動部位に伝えられて、可動部位の一部が固定支持により拘束されてその動きが制限されているため、可動部位に伝達される駆動力の動きは他の部分に蓄積され、抵抗力に打ち勝って動くべき距離は駆動力が作用する距離よりも大きくなるであろう。しかし、このような蓄積された運動で発揮される力は、元の駆動力の一部が固定支持部に加えられるので、増加する距離に比例して減少する[*34]。

(p.46) すべての力学的パワーの最も重要な性質は前の記述の中に含まれているので、各種機器の説明に際して非常に細かく立ち入る必要はないであろう。

5.1 てこ

てこは、固定点つまり運動の中心軸回りに自由に動ける曲がらない棒であり、そのため、てこのすべての部分は共通の中心回りに円弧を描き、それらすべての部分の動きは共通の中心からの距離に比例する。何らかの力がその運動中心から任意の距離のてこ上の点に作用するとき、その距離をてこの実長さまたは半径と呼ぶことができる。なぜなら、それは、てこが運動する間にその点が描く円の半径であるからである。その力はてこの半径に対して直角方向に、つまり作用点から運動中心まで引いた線に対して直角に作用すると仮定しよう。てこをその中心回りに回転させるその力の効果は、作用する力に半径、つまりてこ中心から力の作用点までの距離を掛けた積で表すことができる。そして、積の値が同じになるように加えられた異なる大きさの力も、てこに対して等しい同等の効果を持つであろう。

例：真っ直ぐで曲がらないてこがその長さ方向の中央位置を支点として、棹ばかりのように水平につり合わされていると仮定する。その長さは、24 フィートである。このてこの一端に半径 12 フィートの位置に、6 トンの重りがその半径に対して直角になるように吊り下げられているとすると、そのとき、てこを動かそうとする重りの効果は、(6 ×12 =) 72 で表すことができる。そして、同じてこの最初の重りの反対側の半径 9 フィートの位置に、4 トンの重りをつり下げると仮定すると、この 2 番目の重りの効果は (4 ×9 =) 36、つまり前者の半分になる。

再度、重さ 3 トン別の重りが最後の重りと同じ側の半径 12 フィートの位置に吊り下げられれば、その効果も 36 になるであろう。そのため、後者の二つの重りを組み合わせた効果は 72 となり、したがって、最初の重りの効果に等しくなる。

計算式 (訳注)：てこに複数の力 F_i が作用してつり合っているとき、支点を通る軸回りの力のモーメントの代数和がゼロになる。

$$\sum_i F_i r_i = 0$$

ただし、r_i は軸から力 F_i までの腕の長さ (垂直距離) であり、ある回転方向 (例えば反時計回り) を正とする。

注意：これは、摩擦による抵抗がないと仮定していて、また、てこ自体には重さがないか、またはてこの一方の部分の重さの影響は他方の部分の重さと相殺し合って、それらの間につり合いが生み出されていると仮定している。てこの重量はその重心に作用し、てこの重さに等しい重りがてこの重心から吊り下げられたのと同じ効果を持つ。この重心の位置はもちろんてこの形状によって異なり、p.25 に記載された方法で決定するこ

[*34] (訳注) てこやプーリの経験則を苦労して説明しようとしているが、この説明は現代の力学からすると不正確であり、理解しにくい。

とができる。

上記の規則は、力がてこの半径に対して直角方向に、つまり、作用点から運動の中心まで引いた線に対して直角に作用すると仮定している。力が半径に対して直角に作用しないときは、中心から力が働く方向線まで、その方向線に垂直に引いた線に沿って測った距離をとらなければならない。この距離は有効半径、または有効てこ長さと呼ぶことができる。そして、これが中心から力が加えられる位置までの距離であると仮定すると、てこを動かす力の効果を上記と同じ方法で計算することができる。

すべての場合において、力がてこの実際の半径に対して垂直に作用するかどうかにかかわらず、作用する力の方向に接する円を運動中心回りに描いたとき、その円の半径がてこの有効半径または有効長さとなるであろう。

(p.47) てこの中心から任意の距離の点に力を加えてそのてこが動くと、てこの有効半径はその運動の間絶えず変化し、てこの実際の半径より小さくなるであろう。なぜなら、力が作用する方向を向いた直線は、運動中心からの直線距離を絶えず変えなければならないからである。すべての場合、有効半径はてこの実際の半径は力が作用する方向の線となす角度の正弦 (sin) となるであろう。例えば、前の規則で想定されているようにそれが直角であるときは、直角の正弦は半径に等しいので、有効半径は実際の半径と同じになる。

他の場合で、実際の半径と作用の方向との角度が度で知られているとき、有効なてこ長さは、その角度の正弦を正弦表から取ることにより決定することができ、この正弦の値にてこの実際の長さつまり半径を掛けると、その積が有効半径になる。

例：てこの実際の半径が 8 フィートであり、そして 3 トンの力がその半径と 60 度の角度をなす方向へ作用すると仮定する。60 度の角度の正弦は 0.866 であり、×半径 8 フィート ＝ 6.928 フィートが有効半径つまり有効長さとなる。×力 3 トン ＝ 20.784 となり、これがてこを動かす力を表す。

計算式 (訳注)：

$$
\begin{aligned}
(\text{力のモーメント}) &= (\text{力の大きさ}) \times (\text{作用点の半径}) \times \sin(\text{半径と力のなす角度}) \\
&= 3\ \mathrm{ton} \times 8\ \mathrm{ft} \times \sin 60^\circ = 20.784\ \mathrm{ton\ ft}
\end{aligned}
$$

力の作用線が実際の半径といくらの角度を成すかわからないが、中心を通り作用線に直角に引いた線から作用点までの距離が知られていれば、てこの実際の半径の 2 乗からその距離の 2 乗を差し引くと、その残りの平方根が有効半径になる。

例：てこの実際の半径が 9 フィートであり、支点から作用線にひいた垂線の足から力の作用点までの距離が 3 フィートであるとする。3 フィートの 2 乗は 9 であり、(9 の 2 乗 =) 81 から その値を差し引くと 72 となり、その平方根 8.4 フィートがてこの有効長さである。

5.2 輪軸

輪軸 (wheel and axis) は両端のピボット上で回転できるように取り付けられた円筒形の軸、つまりローラーであり、その円筒表面の回りにロープをコイル状に巻き上げることができる。このロープに、抵抗つまり持ち上げるべき荷重が取り付けられる。その軸に円形の車輪も強固に固定され、車輪と軸を動かすパワーがその車輪の周囲に巻かれたコードに加えられ、コードを引いて巻き戻すことにより、車輪は軸と一緒に回されて軸に巻かれたロープを巻き上げる。しかし、車輪の直径は軸の直径よりもかなり大きいので、車輪から引き出されるコードの長さは、軸の回りに巻き上げられるロープの長さよりも大きくなる。ロープを巻き上げて克服すべ

き抵抗と、コードを引き出すのに加えられる力との大きさの比は、逆に、後者の力が作用する距離と前者の抵抗が作用する距離との比となる。

輪軸は、共通の軸の回りに円を構成するように突き出た無限数の等しい長さの類似のてこで構成されていると見なすことができる。車輪の半径と軸の半径が、てこの運動中心から力と抵抗が加えられる位置までの距離である。

(p.48) 計算に際しては、車輪と軸の直径を用いるのが最も便利であり、そのとき、車輪と軸の実際の直径として、コードとロープの直径つまり太さが追加されるべきである。車輪の直径にその円周に巻かれるコードの直径を加算したものに、そのコードを引くのに加えられた力を掛けると、その積は輪軸を回転させる力の効果を表す。軸の直径にその円周に巻かれたロープの直径を加えた値で、この積を割れば、その商は、そのロープに加えて打ち勝つか、またはつりあわせるために必要な力つまり抵抗となる。

計算式 (訳注)：輪軸がつり合うための条件は、次式である。

$$\{(\text{車輪の直径}) + (\text{コードの直径})\} \times (\text{コードの張力}) = \{(\text{軸の直径}) + (\text{ロープの直径})\} \times (\text{ロープの張力})$$

注意：輪軸では、てこの有効半径つまり有効長さは常に同じであり、実際の半径に等しい。すべての場合で、力が作用する方向は同じ円の接線であるからである。これは、車輪が円であり、軸がその中心を通っていて、その軸はその中心線つまり仮想的な軸の回りを回る円柱である限り真実である。しかし、車輪または軸、あるいはその両方が回転する際に、円以外の曲がった形状のものであれば、その力は運動中心から絶えず異なる距離に作用するであろう。このような場合は、共通の運動中心回りに配置された半径として、長さの異なる一連のてこが連続して作用すると見なすことができる。

非常に多くの場合、車輪にはその円周上に突き出た歯が形作られる。そのような歯は、別のより大きいかまたはより小さい歯車か、または真っ直ぐなラックと組み合わされる。その別の歯車かラックの歯は、輪軸車輪の歯に対応してかみ合わされる。それぞれの突き出た歯のそれぞれが、共通の運動中心から放射状に広がる一連のてこの一つの先端であると考えられるので、すべての歯車機構の場合とてこの場合との類似性は非常に明白である。

5.3 プーリ

プーリは、その中心を通るピンつまり軸を中心に自由に回転するように取り付けられた、小さい円形の車輪であり、その円周はロープやコードを通すために溝状にえぐられている。ロープは、そのプーリの上で U 字形に曲げられて方向を変える。ロープがプーリに通されて引かれると、馬車の車輪が道路上での移動を容易にするのと同じ原理で、プーリが回転することによりロープは長手方向へ自由に動くことができる。プーリは通常ブロックと呼ばれる枠のセルにはめ込まれ、プーリのピンつまり軸がブロックにより支持されている。ブロックには、同じピンに 2 個、3 個またはそれ以上のプーリを並べて配置することができる。

ある場合では、固定支持の一つのブロックが吊り下げられ、プーリを通るロープの一端に力つまりパワーが加えられ、その他端に抵抗つまり荷重が取り付けられる。力と抵抗が同じロープに繋がれる場合は常に、プーリにロープを通すことにより力を増すことはできないが、力が作用する方向を変更することができる。

プーリを用いて小さな力で大きな抵抗に対抗するには、プーリのセンターピンまたはピンが取り付けられたブロックに抵抗を加え、そして、ロープの一端を固定支持部に固く固定して、そのロープの他端に力を加えなければならない。そのとき、ロープがプーリを半周してロープの二つの部分が平行になるならば、ブロックによって引かれる抵抗はロープに加えられる力の 2 倍になる。なぜなら、抵抗の半分はロープの端が固定され

ている固定支持により支えられるからである。そのとき、そのブロックに伝えられる動きは、力を加えているロープの動きの半分の大きさになるであろう。

(p.49) 1 本のロープだけが循環するプーリのすべての組み合わせでは、そのロープに加えられる力の増倍率は、抵抗が負荷されている可動ブロックのプーリの数に対応するが、可動ブロックのプーリ数が同じであれば、固定プーリをどのように組み合わせても力を増強する効果はないであろう。1 個の可動プーリはその力を 2 倍にし、2 個の可動プーリは力を 4 倍に、3 個の可動プーリはそれを 6 倍に、4 個の可動プーリはそれを 8 倍にする。可動ブロックによって支えることができる抵抗は、全ての場合で、ロープに加えられる力に、その可動ブロック内でロープが掛けられているプーリの数の 2 倍を掛けて得られる積に等しい。

5.4 斜面

斜面は水平面とある角度をなす任意の経路または道路であり、その傾斜面上で重い物体を転がしたり引き上げたりすれば、その重量物を上へ上げることができ、この物体の重量が打ち勝つべき抵抗である。斜面は物体の重量の大部分を支えるので、その重量の残りの部分だけが、物体を斜面に沿って引き上げる力に対抗して作用するであろう。物体を斜面に沿って引き上げるのに必要な力は、斜面の長さが鉛直方向の高さつまり水平線からの距離より長くなる比率に応じて、克服すべき抵抗より小さくなるであろう。斜面の長さ、つまり物体がその上を移動するときの長さは、力が作用する距離であり、物体がそのように動いて持ち上げられた鉛直方向の高さは、抵抗が克服すべき距離である。

物体を斜面に沿って上に引き上げるの加えた力に斜面の長さを掛けて、その積を斜面がその距離で上昇する鉛直方向の高さで割ると、その商は物体の抵抗つまり重量になるであろう。

計算式 (訳注)：

$$(\text{斜面の長さ}) \times (\text{斜面に沿う力}) = (\text{高さ}) \times (\text{重量})$$

傾斜面が水平面に対してなす角度 (°) が知られているときは、物体を斜面に沿って上へ移動させるために加えなければならない力は、物体の重量を半径とした正弦 (sin) で表すことができる。

計算式 (訳注)：

$$(\text{斜面に沿う力}) = (\text{重量}) \times \frac{(\text{高さ})}{(\text{斜面の長さ})} = (\text{重量}) \times \sin(\text{斜面の角度})$$

5.5 くさび

くさびはその一端つまりエッジを薄く鋭く作られた金属片であり、他方の端部までテーパ状に厚さが大きくなっている。それは通常、破砕もしくは分割するべき木材や石材の塊の中へ、木槌やハンマーで打撃して先端を打ち込まれる。または、場合によっては、非常に重い質量をそれが置かれた支持から微小な高さ持ち上げるために、その質量の下に打ち込まれる。

くさびの原理は、テーパ上のくさびの二つの面が互いに傾斜した二つの平面であるので、斜面の原理と同じである。その応用での違いは、くさびが抵抗を支えてその下の前方へ動かされるのに対して、斜面は静止しており、抵抗はその斜面に沿って作用する。これにより、その効果や計算方法が変わることはない。なぜなら、くさびの長さが傾斜面の長さであり、その厚い端部のくさびの厚さが斜面の鉛直上昇高さであると見なされるからであり、前述の規則はあらゆる場合にくさびに対しても適用することができる。

5.6　ねじ

ねじは、円筒の円周から紐またはねじ山を突き出して、その周囲をらせん状に巻いたものであり、セルつまり円筒形の穴にはめ込まれる。円筒形の穴にはその内面に対応するらせん状のねじ山が内側へ突き出ていて、ねじのらせん形のねじ山との間の空間を精確に満たすように作られている。ねじがセル内で回されると、ねじ山のらせんが円筒をその軸方向へゆっくりと前進させる。ねじを回すために駆動力が加えられるとき、ねじのその前進運動で抵抗力に対抗するために用いられる。ねじは、その円筒に棒またはレバーを取り付けて、その運動中心からある距離のレバー上の点に力を加えて、その点を円の回りに動かすように回すことにより回転させることができる。この方法では、ねじの作用はてこの作用と組み合わされている。

(p.50) 歯車の歯に作用させてそれを回すために、しばしばねじが使われ、そのとき、そのねじはエンドレスねじまたはウォームと呼ばれる。そのねじは歯車の接線の方向に配置され、歯車の歯は回転するねじのねじ山間の隙間に合うように適応され、そのねじ山がその軸方向へ連続的に進むことにより、車輪の歯をその円形経路に沿って押すことになる。

ねじ自体は、斜面またはくさびの修正に過ぎず、斜路がねじの円筒の周囲に形成されて、円筒を回すことにより、対抗する抵抗を支えて斜面が長手方向へ動かされて進められる。円筒の周囲に巻かれているらせん状のねじ山の長さが斜面の長さであり、そのらせんが円筒に沿ってその軸に平行な方向へ進む距離が、斜面の鉛直方向の高さつまり上昇距離である。

らせん溝つまりらせん状のねじ山の間の隙間に巻かれたコードに力を加えて、その円筒を回転させたとすると、そのときのねじの効果は斜面の効果と同じになる。しかし、レバーを用いることにより、ねじを回す力がその中心から円筒の円周以上に離れた位置に加えられている場合、レバーに力を加えた点で描かれる円の直径が円筒の直径より大きくなるのに応じて、その力の効果は増大されるであろう。

ねじのレバーに加えられる力に、力が作用する点で描かれる円の円周を掛けて、その積を、ねじが 1 回転する間にらせん状ねじ山が軸と平行に進む距離で割ると、その商は長手方向へ動くねじにより支えることができる抵抗となるであろう。

注意：ねじはしばしば、2 本、3 本、またはそれ以上の互いに独立したらせん状ねじ山で作られることがあり、これらは 2 条、3 条、または 4 条ねじと呼ばれる。しかし、そのような場合はすべて、いずれかのらせん状ねじ山が軸と平行に進む距離が、計算の際のデータとして用いられる必要がある。

他の二つの力学的パワー：その性質上、機械に関する著者により一般には気づかれていないが、次の二つの力学的パワーが特に注目に値する。なぜなら、それらは実際には力学的パワーとして広く使われているからである。一つは「ケーブル原理 (funicular pronciple)」、または「張力を受けているコードが横へはじかれるときの作用」と呼ばれている。もう一つは静水圧原理、つまり可動ピストンに対する水または他の液体の作用であり、水または液体の代わりに空気または弾性流体が動作媒体である場合は、「空気圧原理」とも呼ばれる。

5.7　「ケーブル作用」

「ケーブル作用 (funicular action)」とは、張力を加えられたロープまたはコードの中央部分に横方向の力が加えられて、それを直線から曲げて反らせたとき、そのコードを張った両端の支持部を互いに引き寄せる方向へ作用する力のことである。これは弓の弦の作用であり、そこでは、弓で矢を射る準備として弦を引くときは常に、それは弓の両端を互いにより近づけるように作用する。

コードやロープは、力がコードの長手方向に加えられる限りでは、それは力を変更せずにそのまま抵抗に対して伝えるだけであるので、力学的パワーとして動作してその力を増倍させることはできない。しかし、張力をかけられたコードに、その自然な直線から反らすように力を加えるとき、その力が作用する距離は、コード

両端の支持が互いに近づく距離よりはるかに大きくなる。そのため、力が作用するそれらの距離の比率に比例して、支持体を動かそうとする力は元の力よりも大きくなるであろう。

(p.51) 単純なコードの代わりに、大工の折り尺のように 2 本の真っ直ぐで曲がらない棒またはロッドを継手で繋いだものを用いることもできる。その両端を二つの固定支持の間に伸びた状態で繋ぎ、2 本の棒をつなぐ中央の継手が両端の継手を結ぶ直線に近づいたり遠ざかるように移動するとき、それらの支持に対して「ケーブル作用」が及ぼされることになる。曲がらない棒を用いたときの作用は単純な弦を用いた場合と同じであるが、棒はどちらの方向へも作用することができる。中間の継手がその直線から外れるように動かされるとき、支持体を互いに引き寄せるために使用することができるのと同様に、中間継手が直線に近づくように動かされるときは、支持体を互いに引き離すために使用することができる。

ケーブル作用により達成できる力の増倍率は、紐の曲げられる大きさにより相違し、紐が直線に最も近いときに最大で、たわみがより大きくなるにつれて減少する。紐を反らせる力が紐の中央に加えられているとし、その力は紐の両端の支持の間の直線に対して直角に作用すると仮定する。そのとき、加えた力に弦の長さの半分を掛け、その積を紐の中央が直線から反れた距離で割ると、その商は紐がその長さ方向に耐えなければならない力であり、紐を破断しようとする張力である。紐によりその両支持端を互いに近づけようとする力は、弦がその長さ方向に引き合う力よりもむしろ小さくなるであろう。なぜなら、曲げられた弦の各半分が元の直線とある角度をなすので、その結果、支持体に作用するとき、その力はいくらか減少しなければならないからである。しかし、この差は非常に小さいので、実用上ほとんど影響しない。

5.8 静水圧作用

水や弾性流体で満たされた中空シリンダにはめ込まれた可動ピストンに対する、静水圧作用または空気圧作用は、最も重要な力学的パワーであり、蒸気機関およびポンプの運転の基礎となるので、十分な説明を必要とする。その有効性は流体の主要な特性から引き出されていて、次のように説明することができる。

任意の流体が任意の閉じた容器に入れられて、その内部の空間を完全に満たしてそのすべての内表面に接触しているとき、その容器内面がすべての部分で完全に閉じていれば、内面の任意の部分を押すことにより、その圧縮力は内部空間の流体に及ぼされるであろう。しかし含まれている流体は、その非圧縮性またはその弾力性の結果としてそのような動きに抵抗し、そのような圧縮力をあらゆる方向へ均等に伝達分配し、流体が接している内表面のあらゆる部分に対して、その境界を各部の表面積に比例した力で外側へ押すであろう。

例えば、可動ピストンが正確にはめ込まれている中空シリンダの内容積が、完全に水で満たされていて、そのピストンが押されて、水が占める体積を減らすように中空シリンダ内へさらに押し込まれると仮定する。その空間はあらゆる内側面で密に閉じられ、水は非圧縮性の流体であるので、そのシリンダ容器に何らかの開口部か隙間があって、そこから水の一部がシリンダから出て行くことがない限り、その状況下ではピストンは目に見える程の動きをすることはできないであろう。しかし、ピストンによりどのような圧縮力が水にかけられても、それは水に伝達されて、水が接触している内面のあらゆる部分に対して等しく作用するであろう。そして水はその表面のあらゆる部分に押しつけられ、その表面に直角方向に同じ力で外向きに押すであろう。その面の方向が上向き、下向きまたは横向き等のいずれであっても、等しい圧力で押すであろう。その結果、水に接触している表面のどの部分に対しても、水により及ぼされる力は、その表面の面積と圧縮力が加えられる可動ピストンの表面積との比に比例するであろう。

(p.52) 例えば、可動ピストンと反対側の平らな底つまりシリンダの端がピストンと同じサイズであれば、シリンダの端はピストンが水に及ぼす力と等しい力で水に押されるであろう。なぜなら、水はただその力を伝達するだけであるからである。したがって、水が作用する内面の他の部分にかかる力を考えるならば、その力とピストンによって加えられた圧縮力との比は、問題の表面積とピストン自体の表面積との比となるであろう。

シリンダの底を密閉する代わりに、最初に述べたピストンの反対側に別の可動ピストンをその中へはめ込み、両者の間

に含まれる空間を完全に水で満たしたと仮定すると、一つのピストンが押されてシリンダ内へさらに動かされた場合、そのとき含まれている水は他のピストンに対して作用して、それを等しい力と等しい動きでシリンダから押し出すのは明白である。この力と運動の伝達は、シリンダがいかに長くても生じるであろうし、両ピストンが通過する必要のないシリンダの中間部分は、その形を変えられたりまたはサイズが小さくされたとしても、それを水が自由に通過できて、一方のピストンから他方のピストンへ作用できるように十分に開いてさえいれば、何の相違ももたらさないであろう。または、二つのピストンは、二つの異なるシリンダにはめ込まれても良く、それらは互いに必要な距離を置いて配置して、一方のシリンダ内から他方のシリンダ内へ配管または通路で自由に連結してもよい。そのとき、どちらかのピストンが動かされてシリンダの中へ押し込まれると、そのシリンダから水が排出されなければならず、その水を配管を通じて他方のシリンダ内へ運んで、そこで他方のピストンを等しい距離だけ排除して動かすことができるであろう。そして最初のピストンと同じ力で水に作用し、それは単に力を変えずに伝達するだけである。

上記の場合は二つのシリンダは同じサイズであると仮定されているが、一方のピストンがもう一方のピストンより大きい場合は、その時の小さいピストンの動きは、そのピストンの面積が小さいために、大きなピストンの動きよりもはるかに大きくなるであろう。なぜなら、ピストンの動きによって一つのシリンダから排除されるすべての水が他のシリンダに移されるので、そのように移送された水を受け入れるための空間が確保できるように、ピストンを排除して動かさなければならないからである。その結果、このようにして両者のピストンで生じる運動の大きさ (距離) は、互いのピストンの面積に反比例するであろう。

水圧プレス：水圧プレスはすべての力学的パワーの中で最も強力なものであり、これは上記の原理を応用したものである。大きなシリンダには可動ピストンがはめ込まれていて、このピストンに克服すべき抵抗が加えられる。そのピストンは、ポンプによりシリンダ内へ強制的に押し入ってくる水により、シリンダからピストンを押し出すように動かされる。そのポンプは、実際上大きなシリンダに類似の一つの小さなシリンダであり、そのシリンダには可動ピストンがはめ合わされていて、それがそのシリンダ内へ押し込まれることにより水を排出し、それを配管を通して大きなシリンダの中に押し込む。

小さいピストンの面積は大きいピストンの面積より小さいので、大きなピストンが動く距離はポンプの小さなピストンが動く距離よりもはるかに小さい。その結果、大きなピストンが打ち勝つべき抵抗に及ぼす力は、小さいピストンが水に及ぼす力より、両者のピストンの面積に比例して大きくなる。

小さなピストンが及ぼす力に大きなピストンの面積を掛け、その積を小さいピストンの面積で割ると、その商は大きいピストンによって及ぼされる増大された力となるであろう。

計算式 (訳注)：

$$\frac{(\text{ピストン A に加える力})}{(\text{ピストン A の面積})} = \frac{(\text{ピストン B に生じる力})}{(\text{ピストン B の面積})}$$

より、

$$(\text{ピストン B に生じる力}) = (\text{ピストン A に加える力}) \times \frac{(\text{ピストン B の面積})}{(\text{ピストン A の面積})}$$

または、ピストンの直径を用いると、

$$(\text{ピストン } B \text{ に生じる力}) = (\text{ピストン } A \text{ に加える力}) \times \left(\frac{\text{ピストン } B \text{ の直径}}{\text{ピストン } A \text{ の直径}}\right)^2$$

大小のピストンの互いの移動距離の比は、上記の (力または面積の) 比の逆数になる。つまり、小ピストンの移動距離にその面積を掛け、その積を大きなピストンの面積で割ると、その商は、大きなピストンに伝えられる移動距離になるであろう。

(p.53) シリンダから水を押し出して配管を通して送り出すのにピストンが一つだけ用いられてれているポンプの場合も、同じ比率が適用されるであろう。ピストンがそのシリンダ内で動かされる速度または移動距離に対応して、配管内を通過する水に伝えられる速度または移動距離を求めるには、次のようにすればよい。ピストンの速度にその面積を掛け、その積を水が押し出される配管または開口部の面積で割ると、その商は水がその配管または開口部を通過する速度となる。

計算式 (訳注)：

$$(\text{配管内の速度}) = (\text{ピストンの速度}) \times \frac{(\text{ピストンの面積})}{(\text{配管の断面積})}$$

注意：静水圧作用では、あるピストンから別のピストンへ力と運動を伝達する水または他の流体は、非圧縮性であると見なされている。そのため、圧力を受けてもその体積は減少することなく、受け取るすべての動きを伝達するのである。

弾性流体の空気圧作用：各種ガス、空気および蒸気はそれらに十分な圧縮力が加わると歪み、体積が減少してより小さい空間を占めるようになる。しかし、体積が減少するにつれて密度は増加し、より多くの質量が同一空間に集積する結果として、その弾性力が増加する。弾性流体の温度が変化しない限り、その弾性は密度に比例する、つまりその体積に反比例する。

ピストンを動かすために力を伝達する媒体として弾性流体が用いられるときは、流体がピストンを押す力はその弾性力に依存し、その力の大きさは流体が占めることができる空間の体積に依存するであろう。流体がそのような空間に圧縮されて、ピストンに作用するその弾性力が、ピストンの動きに対抗する抵抗に等しくなるならば、その時の流体の作用は、それが非圧縮性である場合と同じになるであろう。なぜなら、実際にはその弾性流体は負荷されている圧縮力以上に歪むことはなく、その結果、流体によって占められている空間へのあらゆる侵入は、水圧作用について既述した比率に従って、侵入と同等のピストンの運動をつくりださなければならない。

弾性流体の作用を計算する際には、その弾性力の強さが常に考慮されなければならず、ある標準的な尺度を用いて参照されなければならない。たとえば、表面の 1 平方インチあたり弾性流体が及ぼす力をポンド (常衡) 重で評価する。または、その重さは流体の弾性力に等しくなる水銀柱の鉛直高さ (インチ) で評価する。または、水柱の鉛直高さ (フィート) で評価する等。あるいは、任意の流体の弾性力は、通常の状態の大気の弾性力との比で表すこともできる (p.11 参照)。

すべての弾性流体は体積が際限なく増大しようとする傾向があり、それにより、任意の質量が割り当てられた真空空間の全範囲を占めることができる。しかし、人間がアクセスできるすべての状況では、そこから固体または液体の物体やあるいは大気の力に等しい弾性力を持つ何らかの弾性流体により、空気が排除されない限り、空間のあらゆる部分を大気圧の空気が占めている。つまり、弾性流体は、自分自身を膨張させてより広い空間を占有するというのに等価な傾向を持っている。大気と接触しないように密閉容器内に閉じ込められている場合を除いて、すべての弾性流体の弾性力について、大気の圧力が共通の尺度を形成する。なぜなら、ある質量の弾性流体が大気の空気と開放的に連通しているならば、その大気の圧力は、その質量の弾性流体が占める体積をある値に変化させて、その弾性力を大気の圧力に正確に等しくなるようにするからである。この大気の力はさまざまな天候状態で変化するが、通常の気圧計や晴雨計で示されるように、平均して高さ 30 インチの水銀柱の重さに等しいと見なすことができる。同等な水柱は 13.55 倍の高さ、つまり 33.87 フィートである。また、表面 1 平方インチあたりの圧力は、14.7 ポンド (常衡) である。

これらすべては、大気と自由に連通する空間を占める任意の弾性流体の弾性力を表すための異なる用語であり、その流体の温度に変化が生じない限り、このように確立された弾性に何らかの変化を生じさせるためには、ある大きさの力学的パワーを加える必要がある。なぜなら、弾性力を増加させるか減少させるかにかかわらず、あらゆる変化は、流体塊をより小さな空間に圧縮することによるか、または、大気圧で占めることが可能空間よりもより大きい空間に膨張させることによってのみ、作り出すことができるからである。

(p.54) 任意の弾性流体を圧縮または膨張させて、その弾性を所定の量変化させるの必要な力は、その流体の温度が常に変化しないとすると、その体積の変化量に比例するであろう (訳注：以下では圧力が体積に反比例すると言っているだけ)。たとえば、10 立方フィートの空間が普通の大気圧の空気で満たされていると仮定すると、その空間の壁内面には 1 平方インチあたり 14.7 ポンドの圧力が働く。そして、10 立方フィートの空間が 5 立方フィートに縮小されたとすると、含まれていた空気が逃げることなく、その温度も変化しないと仮定すると、半分の体積に圧縮された空気は 2 倍の弾性を獲得したことになり、その境界を 1 平方インチあたり 29.4 ポンドの力で押すようになるであろう。または、10 立方フィートの空間が 20 立方フィートに増大したならば、それ以上空気が入ってくることがなく、また温度が変化していないと仮定

すると、2 倍となった体積の中に含まれる空気は元の弾性の半分しか持たず、その境界の 1 平方インチあたりの圧力はわずか 7.35 ポンドとなるであろう。

所定の大きさの空間を占める任意の弾性流体の弾性力にその体積をかけて、その積を圧縮または膨張後に占める体積で割ると、その商は圧縮または膨張後の弾性力である。

計算式 (訳注)：等温変化に対するボイルの法則より、

$$(\text{変化前の圧力}) \times (\text{変化前の体積}) = (\text{変化後の圧力}) \times (\text{変化後の体積})$$

これより、

$$(\text{変化後の圧力}) = (\text{変化前の圧力}) \times \frac{(\text{変化前の体積})}{(\text{変化後の体積})}$$

となる (訳注終わり)。

ピストンがはめ込まれた二つのシリンダを弾性流体で満たした通路で繋ぐことにより、一方のピストンの力を他方のピストンへ伝達することができる。ただし、その弾性流体は一方のシリンダから他方のシリンダへ自由に通過することができ、両シリンダおよびその連絡通路は流体が漏れないように全周にわたって気密を保たれねばならない。そのような条件下で一方のピストンから他方のピストンへ伝達される力は、含まれる弾性流体の弾性力に依存し、そしてそれは上述のようにその弾性流体が占める体積により調整される。抵抗が加えられるピストンに対する弾性流体の圧力が、その抵抗に等しくないならば、そのとき、他方のピストンが動いたとしても、そのピストンは動かないであろう。それにもかかわらず、一方のピストンを動かすのに及ぼされるすべての力は、流体が圧縮されることにより獲得する増大した弾性力により、他方のピストンに伝達される。しかし、そのように伝達された力は、その動きに対抗する抵抗に等しくならない限り、そのピストンを動かすことはできない。

5.9 力学的パワーの組み合わせ

いくらか調査すれば、すべての機械は力学的パワーを様々に修正したものの組み合わせであることがわかる。そのような修正でもっとも多いものは、固定中心回りの部分的または全周の回転運動であり、また、その内部に実質的に含まれているてこを利用して構成することで、その有効性を取り出していることがわかるであろう。例えば、プーリ、輪軸、およびすべての歯車機構はてこの組み合わせであり、ねじは、てこと斜面またはくさびの変形とで構成されている。多くの絶対的に単純な力学的パワーは、既に述べた少数の原則に帰着することができ、それらの少数の原理は、それらが機械の中で組み合わされて応用される方法に応じて、記述不可能なほど多様な形態や動作を呈している。

単純な力学的パワーのあらゆる組み合わせにおいて、それぞれ個々の力学的パワーの効果を計算し、生み出される効果つまりある駆動力により対抗すべき抵抗を、次段のパワーを駆動するのに用いられる駆動力と考えることにより、その平衡条件を計算することができる。

力学的パワーの組み合わせに及ぼす駆動力と打ち勝つべき抵抗力との比は、すべての場合で、種々の力学的パワーに対して同一な既述の一般的原理で定められる。つまり、 駆動力にそれが作用する距離を掛けて得られる積は、対抗する抵抗力にそれが作用する距離を掛けて得られる積に等しいであろう。これは力は運動を伴って作用することを意味しており、運動が生じない場合には、それらの力の比率は、それらが動いたと仮定すれば生じるであろう変位の比率に従って定められるべきである。

(p.55) **力学的パワーの作用に関するこれまでのすべての記述に関する注意：**すでに定められた規則は、駆動力と抵抗力の間の単なる静的均衡の条件を決定するだけであろう。「抵抗に打ち勝つ」との表現は実際には抵抗がつり合わされたことを意味し、それらの規則によって求まる力による平衡状態からは、運動は生じないか

らである。その抵抗力に打ち勝ち実際に運動を引き起こすためには、すべての場合で、それらの間の静的な平衡状態を作り出して保持するのに必要な値以上に、駆動力になんらかの追加を行う必要がある。この追加の力は**プリポンデランス (preponderance; 優位)** と呼ばれ、その量は駆動力に対しても抵抗力に対しても決まった比率関係にはなく、状況に依存して異なる。プリポンデランスの大部分は、力学的パワーの可動部分が固定部分を擦る摩擦を克服するために発揮され、残りの部分がその可動部分を静止から運動状態へ、その慣性に対抗して加速するために発揮される。これら摩擦と慣性の両方の抵抗は、可動部分の数、固定支持に対するその作用の仕方、それらの質量または重さなどに、全面的に依存することは明らかである。

摩擦を克服するために必要な力の追加部分、つまりプリポンデランスは、絶対的な損失となって消費され、運動が維持される限り継続的に更新されなければならない。しかし、その部品を動かすために発揮されるプリポンデランスの部分は、動いている質量の中に残り続けるので、失われることはなく、運動が続く限りそのエネルギーと呼ばれるもの (p.17 を参照) を構成する。そして運動が止まるときはいつでも、すべての内在する力つまりエネルギーは、それらが静止する作用の中で、運動する質量から引き出されねばならない。そのように引き出される力は「勢い」と呼ばれる (p.19 を参照)。プリポンデランスの力の一定部分がその部品を駆動するのに発揮され続ける限り、その運動は加速運動となるであろう。しかし、それらの部品が一様な速度になれば、その速度が一様であることは、その後もなおも発揮されるすべてのプリポンデランスは、摩擦に打ち勝つために費やされているということの証拠である。継続する一様運動では、慣性は運動の開始時または終了時にのみ作用する、つまり、静止状態からその一様運動状態へ加速している間、または、その一様運動状態から静止状態へ減速する間にのみ作用するのである。

5.10 機械、機関、ミルの用語

機械または機関は、適切に言えばツールであるが、これらの用語はどちらも、ある不変の原則に従ってそれを実行して労働を促進するのに用いられる、複雑な構造を意味している。機械という用語は、複雑で強力な操作を行うのに用いられ、そしてその中で単純な力学的パワーが際立っている道具や器具に対してのみ適用されるべきである。機械は機関とほぼ同義であるが、後者は名誉ある区別を伝えることを意図した現代の用語であり、通常とは異なる創意工夫とスキルが明白な力学的な工夫にだけ贈られている。

機械 (machine)、機関 (engine)、およびミル (mill) という用語は、しばしば適切な区別なく使用される。それらはすべて、機械の科学の技芸 (arts) の目的への実用的応用を意味し、すべては単純な力学的パワーの組み合わせで構成されている。

機械 (machine) は、可動部を持つすべてのミル、機関、精密器具 (instrument)、または装置 (apparatus) に対する一般的な用語であるべきであり、それは駆動力の大きさを増大したりその作用を制御するために用いられる。**機械装置 (machinery)** も、機械や機関の可動部および操作部を表す一般的な用語として使うべきであり、したがって、それは単純な力学的パワーとそれらの組み合わせを含んである。同義語のメカニズム (mechanism) は、腕時計、時計、数学機器の部品、またはその他の機械の最も小さい部品などの小さい規模の機械装置に適用されるべきである。したがって、製粉ミルや製材ミルを機械装置、腕時計、時計、太陽系儀 (orrery) をメカニズム等ということができる。

機関 (engine) という用語は、これは有用な技術に水力学または空気圧技術の何らかの原理を用い、その動作は流体に依存または流体を操作する機械に限定されるべきである。これには、蒸気機関、水力機関、ポンプ機関、送風機関、圧力機関、消火機関などが該当する。

ミル (mill) は、原動機を含んだ大きくて強力な複合機械または機械システム用いられるべきである。例えば紡績ミルは多数の異なる機械やそれらを駆動する水車または蒸気機関を含んでおり、圧延ミル、充填ミル、粉砕ミル、丸太ミル、製材ミル、等々も同様である。

(p.56) **注意：**ミルという用語のこの使用には例外がある。この言葉はラテン語で「挽く (grind)」を意味する単語から導かれていて、このため、固体を粉砕したり粉体にしたりするための機械、例えば、コーンミル、樹皮ミル、コーヒーミルなどはミルと呼ばれる。上記の分類によれば、これらは機械と呼ばれるべきである。また、風変わりな力学的ツールで機関と呼ばれるものがあり、dividing engine 、clockmaker's engine 等は機械と呼ばれるべきである。

5.11 機械装置

機械装置 (machinery) とは、互いに組み合わされて機械の手足つまり可動部分を形成するすべての機械的器官の総称である。この用語は普通、可動部分と同様に機械の固定部分も含んでいて、それによって力学原理を実現して、技術と製造のすべての目的に適用可能にする器具や器官をさすと見なすことができる。

すべてのメカニズムつまり機械装置に共通の目的は、機械の原動機の力と運動つまりパワーを修正伝送し、、それを操作対象に適する方法で伝達することである。

このように、歯車、クランク、およびてこの機構により、水車の緩慢な回転運動を、鋸ぎりや他の機械を動かす急速な往復運動に変換したり、または、ポンプなどを動かす緩慢な往復運動に変換することができる。原動機の動く速度は、用途に応じて必要とされる大きな速度または大きな力を発揮できるように、歯車機構により増減することができるであろう。

同様に、平行運動機構、大レバー、連接棒、クランク、およびはずみ車により、蒸気機関のピストンロッドの直線往復運動は、連続的な回転運動に変換される。そしてまたこの動きは、様々な機械を動作させるために、歯車機構により速度またはパワーのいずれかが調整される。たとえば、砥石、丸のこ、紡績機などでは大きな速度が必要とされる。一方、圧延ミル、製糖ミル、ボーリング機、ラッピング機およびその他の機械では、動作させるために大きな力が必要とされるので、より小さい速度で作動させなければならない。

ロビソン (Robison) 博士は、次のように述べている。

"the contrivance and direction of such works constitute the profession of the Engineer ; a profession which ought by no means to be confounded with that of the mechanic, the artisan, or manufacturer. It is one of the liberal arts, as deserving of the title as medicine, surgery, architecture, painting, or sculpture. And whether we consider the importance of it to this flourishing nation, or the science that is necessary for giving eminence to the professor, it is very doubtful whether it should not take place of the three last named, and go **pari passu** with surgery and medicine."

5.12 駆動力

駆動力 (motive force) は、機械に強制的な動きや力学的パワー、つまり、打ち勝つべき何らかの抵抗に対抗する反対する動きを与えるために、それに作用するのに適した方法で収集蓄積されるように受け入れられた自然の力である。実際のメカニックスで一般的に使用される駆動力は、次のように分類される。

I. 人間の筋力はあらゆる種類の小型機械を動作させるために用いられており、動物の力は馬車を動かし、製粉所の車輪を回すのに用いられる。
II. 風つまり大気圧の空気の自然の流れは海上の船舶を推進したり、風車の帆を回すのに使われる。
III. 河川や小川の自然の水の流れは、水車を回転させるのに使われる。
IV. 蒸気の弾性力は、蒸気機関の駆動力である。蒸気は、熱により膨大な体積にまで希薄化膨張されて弾性流体となったものであり、さらに膨張して常に体積を増加させようとする性質を持っている。その結果、蒸気はその占める空間のあらゆる境界面へ圧力を及ぼす (p.9 を参照)。この圧力は、蒸気をシリンダ内へ入れることによりシリンダにはめ込まれたピストンを強制的に動かして、シリンダの内容積からピストンを押し出すのに用いることができる。そして蒸気がこの効果を生み出した後、その増大した体積と弾力性の原因である熱を蒸気を構成している水から抜

き去ることにより、蒸気はそのほぼすべての弾性力を奪われて体積が非常に小さくなるであろう。その結果、弾性蒸気を冷却して液体の水に凝縮することにより、弾性蒸気で占められている空間は排気されてほぼ真空になる。

この方法は、可動ピストンが取り付けられているシリンダの内部を排気するために使用され、そして、そのピストンの反対側の面を押すために高温の弾性蒸気を導入すると、蒸気のほとんどすべての弾性力でピストンを排気した空間へ押し下げるであろう。なぜなら、以前ピストンの下方の空間を占めていた蒸気は、それから熱を奪うことにより凝縮されていて、ピストンを下方にへ押す高温蒸気の力は、ピストンの下側に残った蒸気により、実質的に妨げられたり打ち消されたりしないからである (p.12 を参照)。

大気の圧力は、二次的な力としていくつかの蒸気機関で採用されている。蒸気はその弾性力により任意の空間に入れられてそこから空気を排除し、その後、冷却または凝縮されることによりその空間を排気してほぼ真空にすることができる。大気圧の空気が真空の空間内へ戻ってきて再度占有しようとして及ぼす圧力を、揚水したり可動ピストンを駆動するために使用することができる (p.10 を参照)。

V. 着火された火薬の急激な燃焼で生じる**気体の弾性力**は、硬い岩の粉砕や銃弾や弾丸の発射などのいくつかの目的で駆動力として用いられている。この気体の大きな力は、可燃の混合物の燃焼の際に発生する激しい熱によって引き起こされる。

(p.57) 任意の推進力の強さ (intensity) または活発さ (activity) は、それを静的な力つまり圧力として考えて (p.l6 を参照)、その力とつり合って静的平衡を作り出すような重りを取り付けて、操作対象の物体の動きを止めることにより測定することができる。このように確認された静的な力に、その力が作用して物体を動かす距離を掛けると、その積はその推進力が有する力学的パワーを表すであろう。物体を駆動する中でこのパワーがいくら実現されるかを見るには、それが静止している時と動いている時とで、駆動力の大きさが同じであるかどうかを調べなければならない。なぜなら、異なる推進力は運動により異なる作用を受け、重力を除いてそのすべては、その動作速度が増加するにつれてその活発さの一部を失うからである。それらはそれぞれ、超えることができないある動作速度を有しているのである。

重力は運動によって顕著に損なわれるようには見えない。なぜなら、これまでに機械で作り出された速度において、落下物体の運動を増加させる重力の効果は、(それがどんな速度となっていたとしても)、最初に静止状態から動きを始める時に持っていた効果と同じ程度の大きさであるように見えるからである[*35]。このため、落下物体の一様加速運動 (p.21 を参照) およびこれに基づく重力は、力の尺度となるのに十分に適格である (p.16 を参照)。水車を回すのに作用する自然の水流の場合のように、駆動力の効力が重力から取り出されているとき、その駆動力の所定量を消費することにより機械で実現される力学的パワーの量は、重量物体が機械に作用する速度に応じて減少するであろう。なぜなら、静止状態から運動させるために、そのパワーの一部は重量物体へ伝えられねばならず、そのように伝えられたパワーはそのエネルギーを構成して、速度の 2 乗として獲得されるからである。機械に作用しなくなった後も重量物体はこのパワーを保持し、そのため、それが遅く動作するればするほど、物体自体のエネルギーの中に保持されるパワーが少なくなるので、推進力の消費に比例して多くのパワーを機械に伝達するであろう。

実験によって十分に確立されていないある法則によれば、人および動物が発揮できる力学的パワーは、その作用する速度と共に減少する。

駆動力として使われるときの蒸気の弾性力または大気の圧力も、動きが遅いときよりも動きが速いときの方が、機械に与えるパワーが少なくなるに違いない。なぜなら、蒸気または空気を動かすには、いくらかのパワーがそれに伝達されなければならないからである。しかし、この違いは非常に小さい。なぜなら、パワーは機械に作用する流体のエネルギーを構成する分だけ減少するだけであるからである (p.19 を参照)。このため、蒸気機関は、駆動力の対応する損失を伴うことなく、非常に速い速度で動作するように構成することができる。蒸気機関に類似したシリンダの中のピストンを駆動するのに、蒸気の代わりに水柱が用いられるときは、同じ力が達成できるが、同じ速度で動作させることはできない。通常の蒸気と同じ速度で水にピストンを駆動させるならば、そのとき、ピストンに加わる力は大きく損なわれ、力学的パワーの一部しか取り出すことができない。なぜなら、駆動力の大部分は水自身の運動やエネルギーを生み出すために水に伝達さ

[*35] 重力は地球の中心からの異なる距離に応じて減少し (p.21 を参照)、物体が重力により落下するときは、物体は次第にその中心へ接近しなければならないので、重力の活動はその落下運動の間に絶えず増加していくに違いない。しかし、この種類の影響は、実際の力学では起こり得るすべての場合で、感知できない程度に絶対に微小である。

れ、そのすべてはピストンにとって損失となるからである。蒸気は非常に軽く、その弾性力が非常に大きいときでも、それがかなりの速度で動いているときでも、そのエネルギーは感知できない程度に小さい。

着火された火薬の力は、他のどの駆動力よりも高速で作用することができ、その作用する物体に驚異的な速度の運動を与えることができる。しかし、それが最大の速度で作用するときには、その及ぼす力学的パワーは減少する。

5.13 抵抗力

(p.58) 抵抗力は、人工の機械が操作すべき物体のいかなる動きにも対抗するすべての自然の力である。機械を建造する一般的な目的は、そのような抵抗力に打ち勝って、それとは反対方向へ物体または物体の一部を動かすこと、言い換えれば、物体が占める場所または物体がの形のいずれかを変えることである。

そのような目的を達成するために、十分な駆動力が提供されなければならず、機構は、3 種の部分から成る機械を構成するように組み合わされなければならない。すなわち、第一に、駆動力が属する物体の作用を受けとる部分。第二に、抵抗力に対抗して動かされるべき物体または形を変えるべき物体に作用する部分。第三に、力学的パワーの特性を獲得するように組み合わされ、駆動力が加えられる部分と抵抗力が加えられる部分との間に挟まれる中間部分である。最後の第三の部分は、力と運動を一方から他方へ伝達して、それが抵抗力に打ち勝ってそれと逆向きに迅速な動きを生み出すように、力を適切な方向と強さで動作させる。その速さは、力学的パワーとして作用する部品の倍率に依存するであろう。機械が制している状態で、その作用の強さが抵抗力の強さを十分に超えるような倍率で、駆動力を変換して伝達することになる (その力の倍率に反比例して速度が減少する)。

抵抗力はそれに打ち勝つのに十分な重りを加えることにより測定され、その重りは降下することにより、反対向きの運動を生み出すであろう (p.57 を参照)。

機械の動きに対抗する抵抗力は、機械が応用される対象と同じく多様であり、それらは以下の項目で整理することができる。

I. **重力**。揚水やその他の種類の重量物を引き上げるためのすべての機械では、この抵抗力に打ち勝つ必要がある。これは、最も一般的で、最も明確な抵抗力であり、他のすべての抵抗力は、それを参照して比較される。

II. **凝集力**。この力は物質の粒子を互いに付着させ、固体を形成してその形状の変化に対する抵抗力を生み出す。研削、粉砕、鋸引き、中ぐり、穴あけなどのすべての操作では、凝集力に打ち勝たねばならない。凝集力が物体内で破壊されるときはいつでも、熱が生成される。液体内でも、粒子間の凝集が存在し、それにより形状の変化に抵抗する。

III. **固体の弾性力**。これは、固体の変形を生み出している全ての力が無くなったときに、固体を元の形に復元する力である。反作用または元の形への復元は、凝集が破壊されていないときは、粒子のその凝集力から生じるが、それを超える何らかの力が作用すると、降伏が生じてしまう。固体の弾性は、麻、綿、布、紙、油性種子などの弾性体を押したときに、反作用として生じる抵抗力です。

注意：すべての固体は大なり小なり弾性を持つので、弾性力はある程度、凝集力と同じ性質を持っている。凝集力および弾性力による抵抗力は多種多様な操作の中で組み合わされて、それらを個別の力として区別することができない。例えば、ハンマリング、圧延、および金属の線引き操作では、それらは弾性によりある程度の圧縮に抵抗するが、その圧縮が一定の限界を超えて行われるならば、粒子の内部配列は永久的な変化を受け、そしてその物体はその後、その元の形を回復することはなく、圧縮の影響を保持するであろう。

IV. **気体状の流体の弾性力**。気体状の流体の弾性力は、容積を増大してより大きな空間を占有しようとする性質であり、同時に、それらはより大きな力により凝縮して、実際に占めている体積より小さい体積へ収縮しようとする。これは、炉を送風する空気を圧縮する操作、ソーダ水や照明用可搬式ガスのビン充填操作における抵抗力である。機械の操作が固体や液体の形状変化を引き起こしたり、それらの粒子の内部組織に何らかの変更をもたらすときや、または、なんらかの気体状の流体をより狭い空間に圧縮してその体積が減少することにより、その密度を増加させるように作用するときはいつ

でも、その機械は凝集力および弾性力による抵抗に遭遇しなければならない。

これらの抵抗に加えて、機械の可動部分が固定部分との間で擦れる摩擦が、常にそれらの動きを遅らせて妨げる傾向がある。それらの可動部分とそれにより動かされる物体の慣性は、そのような運動の速さに変化が生じたとき、つまりその運動が一様でないときは、常に機械の動作に影響を与える。空気の抵抗は、機械部品が迅速な運動を継続する上でかなりの障害となる。また、水や他の液体に浸されている物体の運動は、液体の粒子がその分離に対抗する抵抗を受ける。これらの抵抗のいくつかはすべての機械の運転で不可避の事象であり、本来なら期待できたはずの有用な効果から差し引かれることになる。これより、これらの不可避な抵抗は、機械が有用な目的のために対抗すべき抵抗力とは別に考慮されねばならない。

(p.59) 機械の動作は、それを動かす駆動力の種類よりも、抵抗力の種類の相違により大きく影響される。抵抗力および駆動力の種類が異なれば、運動による影響も異なってくるからである。

摩擦による抵抗は、その速度によらず同じ力を必要とするのでその大きさは運動により変わらない。重力による抵抗も運動による影響を受けないが、それが加速または減速を伴うときは、重力の影響よりも慣性の影響が大きくなる。凝集力による抵抗、つまり固体の粒子を分離するのに要する力は、おそらく抵抗に対抗する運動の速度と共に増加するであろうが、このことは実験により証明されているわけではない。また、弾性体が圧縮に対抗する抵抗はその運動が速いときは遅いときよりも大きくなるが、その法則は確認されておらず、おそらく異なる物体で相違するであろう。流体がその中に浸された物体の動きに及ぼす抵抗は、その運動速度の 2 乗に従って増加する。

種々の抵抗に異なる速度で打ち勝つのに要する力は上記の通りであり、それぞれの場合に消費される力学的パワーは、その抵抗の値にそれに対抗して動く速度を掛けた積により表されるであろう。例えば、流体の抵抗に打ち勝って物体をその中で動かすのに消費されねばならないパワーは、その物体の運動速度の 3 乗に比例するであろうから、2 倍の速度を生み出すには 8 倍のパワーが消費されねばならない。慣性に対抗して物体に運動を与えるのに伝達されなければならないパワーは、静止状態からの加速運動で生み出された速度の 2 乗に比例するであろう。摩擦に打ち勝つのに消費されなければならないパワー、または、重力に対抗して均一に運動するときに消費されるパワーは、単に運動の速度に比例するであろう。

抵抗力の組み合わせ。抵抗力の簡単な例は、実際にはほとんど発生せず、普通は、いくつかの原因が組み合わされて機械の動きの抵抗となっている。異なる抵抗は異なる法則で増加することが観測されるので、組み合わされた抵抗を任意の普通の尺度まで低減することは、時には非常に困難となる。

例えば、ある機械が重い物体をその重力に抗して引き上げるために使用されるとき、その重い物体の静止した状態から運動状態へ移る間、その慣性は運動の追加の抵抗を引き起こすであろう。しかし、意図した速度が達成されてその速度で一様に運動し続ける間は、その慣性はその運動を抑えたり増加させたりする効果を持たなくなる。引き上げる物体の重力、機械の可動部の摩擦および空気の抵抗は、あらゆる状況下で運動を妨げ続けるであろうし、また、その運動の速度が変化するときにはいつでも、ふたたび可動部の慣性がこのような変化に対する抵抗となるであろう (p.17 を参照)。

ハンマーを打ち下ろすためにそれを迅速に持ち上げるとき、その重力と慣性力は両方とも運動を妨げるように作用するであろう。

すべての複合的な機械では摩擦はかなり大きく作用してその動きを遅らせており、研磨、研削、鋸引き、穿孔などの多くの力学的な操作において、実行すべき最終的なタスクは摩擦とほぼ同じであり、同じ増加法則に従う。すべての機械はこのように摩擦を受けるので、それを動かすためには、動作する物体の推定される (sensible) 運動で計算されるよりも、より多くの力学的パワーを消費しなければならない。

ポンプにより揚水するための蒸気機関では、複合抵抗は、水の重力、運動の静止状態から変化するときのその慣性、弁の小さな流路を通って流れるときの流体変形によるその粒子の付着力 (訳注：粘性)、から成り立つであろう。この水の変形は速度の大きな変化も伴うので、流体における付着力による抵抗は慣性による抵抗と不可分に組み合わされている。最後に、蒸気機関の複合抵抗に、機関の固定部分と接した全ての可動部分の摩擦と、水が通過する管内面に対する水自身の

摩擦とが加わる。

(p.60) 蒸気機関の力学的パワーにより水の中を推進される蒸気船またはその他の船舶においては、その抵抗は非常に複雑である。船体が通過する流体中の経路において、絶えず流体の新しい質量が静止状態から運動状態へ投入され、その慣性によりその運動が妨げられる。その運動に投入される水の部分は、船体の前部で水面上に盛り上がった部分へ投げ上げられ、したがって、その重さにより抵抗となる。水中を船体が通過するために水が変形し、水はその凝集力によりその形状変化に抵抗する。船体の底部に対する水の摩擦は大きい抵抗となる。また、機械装置の可動部分の摩擦も考慮されなければならない。

5.14 摩擦

摩擦は、運動する物体が運動に参加しない他の物体と接触することにより、接触している表面間で滑りや擦りの相対運動が起こることにより引き起こされる抵抗である。摩擦は密接に接触している物体の表面間に存在して、大なり小なりそれらを互いに結合しようとする、自然の引力と凝集力の結果である。これは滑らかであってもすべての面に存在すると考えられる見えない突起や凹凸が対応する孔またはへこみ部へ互いにめり込んだり絡み合っていることも関係するであろう。その結果、互いに強制的に接触して保持された 2 面の間で何らかの運動が生じると、絡み合っている突起の小さな粒子は破壊されて、塊から分離されるに違いない。または、一方の面の微細な隆起が他方の面の上に乗り上がって通過し、両方の面を接触させ続けようとするある力に対抗して、両物体を互いにより遠くへ引き離すであろう。

摩擦による抵抗はある程度、凝集による抵抗のような性質があり、物体の凝集力による他の抵抗の場合と同様に、擦られる面の摩擦により熱が発生する。その最大の熱は、粒子の磨耗が最大となるときの摩擦によって発生する。油およびグリース、または動物性脂肪をその摩擦面の間に塗ると、それらの表面の凹凸を埋めて凝集と相互の絡み合いを減らすことにより摩擦を減らし、同様に粒子の消耗を減少させる。水やタール、または腐食性でない液状の物質も同様の傾向があるが、油性物質ほどの効果はない。

摩擦を力と呼ぶことは、適切ではない。なぜなら、摩擦はどのような場合でも運動を生み出すことはできずに、それを常に妨げて、摩擦が無ければ所定の駆動力により得られたはずの速度を速度を遅くするからである。その抵抗の値は摩擦面間が動いている間に測定されなければならず、そして、この種の実験から以下の事実が確認されているように思われる。

I. 摩擦に打ち勝ち、接触している物体の滑らかな表面間に相対運動を作り出すのに要する力は、接触させている圧力に近似的に比例し、そしてある限度内では、接触面の大小は摩擦の大きさに感じ取れるほどの差異を生じないように見える。

例えば、滑らかで水平の床の上で荷物を載せたそり滑らせてそれを引くには、一定の牽引力を必要とする。同じそりが同じ床に 2 倍の重さで押し付けられるならば、それを滑らせには 2 倍の牽引力が必要となるであろう。しかし、そりの重さが同じであるならば、それを滑らせるのに必要となる牽引力は、床に接する面が狭いときでも、それが広いときに要する牽引力と同じになる。

この比率は、与えられた摩擦面の圧力が二つの表面の硬さと滑らかに応じて適度の範囲内の強さであって、相互の隆起と凹凸とが、それらの隆起を形成する物質の粒子を分離することなく、反対面の窪みや凹凸を滑って乗り越えることができる時は、すべての場合で正しいように見える。この摩擦の原因に打ち勝つのに必要な力は、圧力に比例するであろう。

(p.61) この比例関係の限界は、摩擦面が互いに強い力で押されて、一方の面の顕著な凹凸が押し付けられて、他方の面に対応する窪みを作るときである。両面間の運動は、絡み合った粒子を固体塊から切断して破壊するであろう。そして、対抗すべき抵抗は分離され物質粒子の凝集力となるであろう。このような場合、摩擦面では熱が常に発生する。このことは特に、粗い硬い物体が (滑らかであったとしても) 柔らかい物体に擦られるときに観察される。例えば、研削ややすりがけの操作では、激しい騒音と熱を伴って目に見える形で粒子が切断破壊されている。摩擦面間では常に磨耗や摩滅が発生し

熱が生じることに示されるように、この原因による摩擦抵抗は、多かれ少なかれ常に起こっている。

もし急速に切断と磨耗が生じるのであれば、その圧力に比例して面を増加させることにより、その作用は減少する。その結果、その圧力がより大きい面に作用するときには、小さい面に作用するときより、その摩擦は面を接触させる圧力に対してより小さい比率となるであろう。しかし、面がその切断、磨耗、発熱が認められない程度に十分大きければ、摩擦はほぼ圧力に比例する。所定の面がさほどの切断を伴わずに維持するであろう実際の圧力の強さは、それらの面が互いに擦れ合っているとき、その物質の硬さやそれらの面の滑らかさ、それらの面間の相互の吸引力、介在される流体の種類、摩擦運動の速さ等々の、様々な状況に依存する。実際には、急速な磨耗を防ぐだけの十分な表面が与えられなければならず、さもなければ、発生した熱が蓄積されて介在する流体を乾燥させ、面を柔らかくして削り取ることにより、すべての限界を超えて摩擦や熱が増加する。

II. 摩耗または切断や発熱が感知できない程度に遅い場合では常に、摩擦に打ち勝って、接触物体の滑らかな面の間で相対運動を生み出すために必要な力は、その運動速度とは独立である。なぜなら、その力が作用する速度に応じて、同じ力が任意の運動速度を生じるからである。

例えば、荷物を載せたそりを平滑な床に沿って引く牽引力は、それが速く引かれるか遅く引かれるかに依らず、同じ値となる。そのため、摩擦に打ち勝つために消費されなければならない力学的パワーの値は、その消費により生成される運動の速度に比例することになる。例えば、任意の機械の部品の摩擦により、それが所定の速度で動いている間に、力学的パワーがいくら失われようとも、(摩擦部分の圧力が同じ値に留まると仮定すると、) 機械が 2 倍の速度で動くときは、摩擦により 2 倍のパワーを失う。以下、同様にパワーは速度に比例して増える。

また、摩擦によって失われる力学的パワーの量は、すべての場合で、時間に関係なく接触する面上を通過する距離に比例する。例えば、鉄道線路に沿って所定の距離だけ貨車を移動させるのに消費される力学的パワーの量は、その距離を素早く移動させるか、またはゆっくり移動させるかに依らず、同じになるであろう。

III. 摩擦面の接触を維持する圧力と、その摩擦に打ち勝って両表面間の相対運動を生み出す力との間の実際の比率は、表面を構成する物質の硬さと滑らかさに依存する。なぜなら、これが目に見えない凹凸の相互のめり込みと絡み合いの程度を決定するからである。面を構成する二つの物質の間に存在する相互の吸引力と付着力の程度は、摩擦に大きな影響を与える。両方の摩擦面が同じ種類の物質でできている場合、互いに化学的に作用し合わない等の適切な組み合わせである限り、それらの面が異なる物質である場合より一般に摩擦は大きくなる。二つの面間に同じ物質を含む組み合わせではなく、異質な物質の組み合わせを選択すれば、相互の吸引力と付着力をより小さくすることができる。同じ物質の二つの面が組み合わされるときは、物質が異なる場合よりも、一方の面の凹凸と窪みが他方の面のものにより正確に対応して適合するであろう。そのため、それら凹凸を他方の凹凸の一つから上昇させるのに、より大きな力が必要となるであろう。摩擦の量はまた、面の間に介在される液状物質の種類に応じて異なる。これらの異なる原因が摩擦の量に及ぼす影響は、状況に応じて異なる。

(p.62) 一方の面が他方の面にインプリント (imprint; 圧痕) を与えるのに抵抗する最も重要な状況は物質の硬さであるが、必要な硬さの程度は所定の面への圧力に対応して異なるであろう。なぜなら、二つの硬い物体が大きな圧力で互いにインプリントするより、二つのより柔らかい物体が小さい圧力でインプリントする方が、その圧力はより小さくなるかも知れないからである。硬い物質の物体はその粒子がより強固に凝集しているので、もっとも緻密に研磨を行うことができる。そのの研磨では粒子は表面から個別に分離されるか、または柔らかい物質よりも、より小さな塊で分離されるからである。それに対してより柔らかい物質の研磨では、その粒子はより大きな塊となって分離され、研磨面上により大きな空洞とより大きい突起を残す。このことは、大理石の表面の研磨度と比較して、柔らかい粗い石灰岩の表面で得られる研磨度を考えることにより、容易に理解できるであろう。

一方の摩擦面がよく研磨された硬い物体であるならば、他方の面は柔らかい物体でもよい。なぜなら、柔らかい物体の

凹凸は硬い面に突き刺さったりインプリントしたりできず、その面が研磨されることによりそれ自体の凹凸が大幅に減少するからである。両方の面が硬い物体でよく研磨されているのであれば、摩擦はさらに少なくなるであろう。機械部品の実際の摩擦についての更なる実験が望まれるが、以下のものはクーロン (Coulomb) 氏の実験結果である。

オーク材の滑らかな面は他のオーク材の同様の面の上を、両面を接触させる圧力の $\frac{1}{10}$ の牽引力により、(両者の木目の方向へ) ゆっくりと滑ることができる。それらの面が動かずにしばらくその圧力で接触したままになっていると、それらはインプリントして付着し、静止状態から動きを始めるためには、圧力の 0.43 倍[*36] に相当する力が必要である。その運動を続けるには、圧力の $\frac{1}{10}$ の力で可能であるにもかかわらずである。一方のオーク面の木目が他方の面の木目と交差するときは、静止状態から動き始めるための摩擦は圧力の 0.26 倍であり、その運動を続けるための摩擦は圧力の $\frac{1}{10}$ である。オークがモミに対して木目方向に滑る場合、滑り始めるとき 0.65、継続するとき 0.16 の摩擦力。モミがモミに対して滑る場合、滑り始めるとき 0.56、継続するとき 0.17 の摩擦力。ニレがニレに対して滑る場合、滑り始めるとき 0.47、継続するとき 0.1 の摩擦力が作用する。

これらの比率は面が乾いているときのものであり、新鮮なグリースを入れれば、オークに対するオークの木目方向の摩擦は、滑り始めるときに 0.38 、滑りを継続するときに 0.038 となる。しかし、グリースがある時間使用されて柔らかくなると、滑り始めるのに 0.24、滑りを継続するのに 0.08 となる。

研磨された鉄の面がオークの上を木目の方向へ滑るとき、面が乾いている場合は、滑り始めるための摩擦は圧力の 0.2 倍、それを継続するための摩擦は圧力の 0.17 倍である。または、面の間に柔らかい獣脂を入れた場合は、静止状態から滑り始める摩擦は 0.11 倍、運動を継続する摩擦は 0.07 倍となる。

研磨された鉄の面が別の研磨された鉄の面上を滑る場合の摩擦は、面が乾燥しているときは圧力の約 0.28 倍であり、油または柔らかい獣脂グリースが塗布されている時は 0.1 倍 である。金属の面間の摩擦は、運動を継続するときもそれを始める時とほぼ同じである。

真ちゅうの研磨面上を滑る鉄の研磨面の摩擦は、乾いているとき圧力の約 0.26 倍であり、油またはグリースを塗った時は 0.09 倍 (約 $\frac{1}{11}$) である。

注意：摩擦面の間にグリースが入れられると、摩擦は大幅に減少するが、グリースの付着性と粘着性が両面間の動きにある抵抗を引き起こす。この抵抗は接触面積に比例するが、面の摩擦は表面ではなく圧力にほぼ比例するので、グリースを挿入した場合の影響はそれを挿入しない場合より大きい場合があり、グリースの種類も影響する。最も流動性の高いグリースまたは液体の油が最良であるが、摩擦の間に硬い獣脂よりも急速に消費されるので、継続的に補給する必要がある。

動きが速いとき、圧力が大き過ぎなければ摩擦により緩やかに熱が発生するが、表面にグリースや油が十分に供給されている限り、増加することはないであろう。そのとき、動きが遅い場合よりも摩擦は小さくなり、それはおそらく、熱と速い動きがグリースをより流動的にし、表面の軟化や研磨に影響を与えずに、その付着性の影響を取り除くからである。これらの最も有利な状況下で、グリースの供給がうまくいかなければ、表面は密に接触し、摩擦が増大し、より大きな熱を発生し、それによって表面の研磨が損なわれ、そして、それは急速に切断磨耗し始める。面が互いを切断され始めた後、摩擦と熱は驚異的に増加し、火を出すことさえある。金属表面はしばしば赤熱し、溶融して一つの硬い塊になる。それらの凝集力に対抗して摩擦面の粒子を互いに強制的に分離すると、熱を発生し、それが蓄積するならば、それは面を柔らかくし、油性物質を乾燥させて、付着を促進して摩擦を増加させるであろう。

そのため、圧力は適度の高さを超えてはならず、面の硬さが互いに imprint せずに耐えることができる限度を越えて、面を密着させないようにしなければならない。さもなければ、それらは付着を引き起こし、急速に切断または摩耗するであろう。この注意は、速い動きが必要な場合には不可欠であり、さもなければ、摩擦は熱の蓄積を生み出し、限界を超えて増加し続けるであろう。動きが遅い場合は、たとえ面が互いにある程度切断して熱を発生させても、それは周囲の物体により運び去られ、蓄積することはないであろう。

[*36] (訳注) 原文では " .43 hundredths" となっている。いかにも " .1 tenth" 等となっている個所が見られたが、いずれも "handredth(s)"、"tenth(s)" を無視した。

5.15 プリポンデランス (Preponderance)

(p.63) プリポンデランスは、機械の駆動力のうち抵抗力を超えた過剰部分のことであり、それは機械の運転の中で失われる、つまりその運動を生み出すのに消費されると考えることができる。機械の可動部分の摩擦と運動開始前に作用するすべての偶発的な抵抗に対して、必要な駆動力を正しく推定値を求めてみると、その駆動力は抵抗力を上回っていることがわかるであろう。

実際、一様な運動が達成されると、駆動力のプリポンデランスはすべて、摩擦と空気抵抗、および運動中に発生または増加するその他の付随的な抵抗に打ち勝つのに費やされなければならない。有用な抵抗力にそれらの付随的な抵抗を組み合わせた合計は、駆動力の値と正確に等しくならなければならず、プリポンデランスとなる力は残らない。これが等速運動を構成する**動的平衡**の状態である。抵抗力を超える駆動力のプリポンデランスが残っている限り、そのプリポンデランスは加速運動を生み出さねばならず、運動開始時に存在していたそのプリポンデランスがゼロとなるまで、一様な運動は達成できない。プリポンデランスがゼロとなるのは、ある速度が達成された時であり、それ以降、加速は無くなって運動は一様になる。

たとえば、二つの等しい重りをプーリを通した紐の両端に吊り下げるとすると、それらはつり合って動かないであろう。しかし、その一方に十分な重りが追加されるならば、その重りが一緒に降下して、他方の重りを引き上げるであろう。そのように加えられた重りはプリポンデランスの力と呼ばれ、運動を生み出す力である。なぜなら、その力は、プーリと紐の摩擦、空気の摩擦および両方の重りの慣性に打ち勝つのに費やされるからである。その慣性は、その運動速度に何らかの変化が生じている間を除いて運動に対抗することはできず、その運動が一様になったときは、抵抗に対抗するのを止めなければならない。摩擦は、あらゆる運動速度に対して一定値の抵抗となる。運動に対する空気の抵抗は、速度の 2 乗に比例して増加する。

もし実験が真空中で行われたならば、プリポンデランスを付した重りの下降力は、運動が速くなっても遅い時と同じ大きさの摩擦によって対抗されるだけであるので、重りの運動は加速し続ける。プリポンデランスの力が摩擦に対抗できるに等しいだけであれば、そのとき、重りを加速することはできず、運動しているか静止しているかは不確定である。プリポンデランスが摩擦に打ち勝つのに必要な値より大きければ、そのとき、その超過量が運動を生み出そうとし、その傾向は運動が作り出された後も作用し続けるので、その結果、真空中を自由落下する物体の運動 (p.14 および p.21 を参照) と同じ、一様な加速運動となるであろう。ただし、加速度はより小さくなる。

加速力は動いている物質の全重さに比例するので、このような状況で二つの重りが所定時間内で得る速度は、物体が真空中を自由落下することにより同じ時間内で得る速度と、一定の比率となるであろう。その加速力は、プリポンデランスの重さから摩擦を引いたものであるが、自由落下する物体の場合は、その物体の全重さである。動かされる質量は同じであるので、二つの場合で生み出される速度の比はそれぞれの加速力と同じ比となるであろう。

たとえば、二つの等しい重り紐は 28 ポンドの重さであり、4 ポンドの重りがその一方に加えられたと仮定すると、そのとき、動かされる質量は 32 ポンドである。プーリと紐の摩擦に打ち勝ち運動と静止の中立状態を生み出すのに、2 ポンドが必要とされると仮定すると、そのとき、32 ポンドの質量を動かすのに 2 ポンドの加速力が残るであろう。つまり、加速力は動かされるべき質量の重さの $\frac{1}{16}$ となる。この場合、任意の時間内に生み出される速度 (または描かれる距離) は、物体が真空中で自由落下することにより、同じ時間内に得られる速度 (または描かれる距離) の $\frac{1}{16}$ となるであろう (p.23 を参照)。

ある物体が流体内を落下するとき、流体の重さにより物体の重さの一部が打ち消されるが、その原理は同じである。例えば石が水中を沈下するとき、その石が等体積の水の 2 倍の重さであれば、そのとき、加速力は移動する質量の半分だけの重さになる。しかし、そのようなすべての場合では、運動に対抗する流体の抵抗が考慮されなければならない。

上記の二つの重りが空気中または水中を動くならば、流体がその運動に与える抵抗は、速度の 2 乗に比例して増加するであろう。そのため、運動が得られるにつれて、抵抗が増加して加速の進行を妨げるようになり、加速度は徐々に小さくなり、加速が停止する。これは、摩擦に打ち勝つのにまだ採用されておらず、最初は加速を生み出すのに使われていたプリポンデランスのすべての部分と、空気の抵抗とが等しくなる速度が得られたときに起こる。十分な速度が達成されたとき、プリポンデランスはもはや残されていないので、その加速は停止するであろう。なぜなら、その増速された状態での

抵抗は駆動力と正確に等しくなるからであり、動的平衡が確立されて、運動は一様に進行するからである。運動に対抗する慣性の影響も停止するが、すでに獲得している運動を継続し、その速度を変更しようとするどんな傾向にも対抗するであろう。

(p.64) プリポンデランスは運動を生み出すことで消費されているとの一般的な説明は、運動が加速されている間だけ真実であり、そのときでも、それはエネルギーを構成する運動質量の中に、再度取り出すことができるように、蓄積されているだけである (p.17 を参照)。一様な運動が達成されたとき、それはプリポンデランスが無くなったという証拠であり、運動により抵抗が増加したか、または駆動力が運動と共に減少したか、または、これら両方の原因が動的な平衡を生み出すように作用したかのいずれかである。

プリポンデランスとなる力が重力であるすべての場合で、打ち勝つべき抵抗のいくらかの部分が速度と共に増加する性質を持たない限り、一様な運動に到達することはできない。摩擦も慣性もこの性質を持たないが、流体の抵抗はそれを持っている。

プリポンデランスのもう一つの例として、蒸気機関のピストンにかかる蒸気の平均圧力を考え、そのピストンが毎分 200 フィートの速度で動いているとき、その圧力が 2200 ポンドであるとする。その駆動力により発揮される力学的パワーは、毎分 440 000 ポンドフィートとなるであろう。もし、この機関がポンプで揚水するのに用いられるならば、それはおそらく、わずか 1650 ポンドを毎分 200 フィートの速度で上げることが分かるので、したがって、その性能の力学的効果は、わずか毎分 330 000 ポンドフィートとなるであろう。

抵抗力を超える駆動力のプリポンデランスつまり過剰量は 550 ポンドであり、毎分 200 フィートの速度で作用しているので、それは毎分 11000 ポンドフィートの力学的パワーとなる。このパワーは、機関の可動部分の摩擦と、ピストンの運動が毎分 200 フィートのときに作用する他の様々な付随的な抵抗とに、打ち勝つために消費される。摩擦と他の様々な付随的な抵抗の和は、550 ポンドのプリポンデランスに等しい。このような偶発的な抵抗の原因は既に述べられているが、それらは機関が作り出すべき有用な効果には含まれないので、通常それらは計算されることはなく、損失として説明される[*37]。

5.16 機械の運動速度を決定する条件

これは、駆動力が抵抗力を超えるプリポンデランスまたは過剰量に依存する。このプリポンデランス量は機械が静止しているときに測定されるものとする。しかし、その作用により生み出される運動は、動いている時に生じる駆動力と抵抗力の強さの変化を考えることなしには、事前に決定することはできない。

機械のほとんどすべての有用な動作は一様な運動で行われ、そして既に述べられたように、そのような場合は、すべてのプリポンデランスの力はある量の抵抗に打ち勝つために消費されなければならない。しかし、駆動力のプリポンデランスに依らない限り、静止状態から運動を開始することはできないので、加速による機械の運動の開始と、それが達成された時の運動の一様な継続とは、異なる法則に従わなければならない。プリポンデランスは最初の始動時に能動的に作用する力でなければならないが、しかしそれは徐々に受動的になるか、加速の過程で無力化されなければならない。そうでなければ、均一な運動を達成することができないであろう。

ある場合では、抵抗またはその一部が速度とともに増加して、ある速度で増大したその抵抗が駆動力と等しくなり、プリポンデランスが残らなくなる。そのとき、動的均衡が確立されて、運動は一様となるであろう。他の場合では、駆動力が速度と共に減少して抵抗と等しくなり、運動を開始した最初の時点で存在していたにちがいないそのプリポンデランスは、全く残らなくなる。

[*37] (訳注) この例での、力と動力の収支は下表のようになる。

	力 (lb)	速度 (ft/min)	動力 (lb ft/min)
ピストン (駆動側)	2200	200	440000
ポンプ (負荷側)	1650	200	330000
プリポンデランス	550	200	110000

実際には、これら両方がしばしば同時に起こり、機械の一様な運動は、一方では駆動力の低下のの結果であり、他方では抵抗の増加の結果であり、それによりある速度で両者が等しくなる。従って、駆動力と抵抗力との間のある定まった比率や、ある特定の速度で機械を動かすようなプリポンデランスの定まった値は、存在し得ないことは明らかであり、それは種々の状況の組み合わせに依存するに違いない。

5.17 力学的効果

力学的効果とは、その目的のために力学的パワーの支出を必要とするなんらかの操作の成績を表す用語である。すべての力学的効果は、抵抗力に対抗して物体内に作り出される強制運動の場合ごとに区分できる。その尺度として、通常、重力による抵抗が選択される。

(p.65) 機械により作り出される力学的効果を見積もるには、その運動に対抗するすべての抵抗力を考慮する必要があり、それぞれの抵抗力に打ち勝つのに必要な重さと必要な運動速度を求めると、このような重さに、それが作用する距離、または所定の時間内に一様に下降した速度を掛けることにより、力学的パワーを計算することができる (p.16 を参照)。駆動力も同様にして見積もられ、それによりなされる力学的パワーは、一様な運動つまり動的平衡状態となるすべての場合において、抵抗力によりなされる力学的パワーに等しくなければならない。

実用上では、様々な抵抗力の実際の値を常に把握することはできず、特に、静止状態の力ではなく、運動に対する時だけ作用する摩擦や慣性は、そうである。これらの複雑な抵抗の多くは、複数の原因の組み合わせから生じるものであり、現在知られている何らかの規則に還元することはできない。

これより、力学的効果の用語は、通常、他のすべての抵抗を損失と見なして、ある与えられたパワーの消費により達成される有用な結果に限られている。例えば、揚水のための機関の力学的効果は、所定の時間内に所定の高さまで上げることができる、水の量に従って算出され、不可避的な抵抗によるパワーの損失は含まれていない。または、それが今までに計算されているのであれば、それは力学的効果に追加として述べられている。

したがって、蒸気機関は、それ自身の部品の摩擦に打ち勝ち、それ自身の空気ポンプを動作させる等々に加えて、毎分 528 立方フィートの水を 10 フィートの高さへ上げると表現する。または、小麦粉ミルは、その機械の摩擦とは独立に、毎時間 10 ブッシェルの小麦を挽いて小麦粉にすると言う。鉄道線路に沿って荷物を積んだ貨車を牽引する機関車の機関の場合には、上記の表現による力学的効果は作り出されず、すべてのパワーは、機械の摩擦に打ち勝つために発揮されます。機械の摩擦は状況により変化し、その値は実際の試行錯誤によってのみ確認することができる。

5.18 機械によりなされる力学的パワーの標準尺度

普通の人々に最も身近なものであることから、人間および馬の力がこの比較基準として採用されてきた。しかし、それは非常に不明確であり、個体により大きく異なる可能性がある。所定の時間内に任意の機械によりなされる力学的パワーの量に対する確定的な尺度は、以下のものである。力学的パワーは、抵抗力に相当する重さに所定の時間内で一様な運動のもとでそれが作用する距離を掛けた積で表される。

注意：すでに (p.16 で) 述べられているが、力学的パワーの尺度を考える上で時間は本質的な部分ではないが、現在の例では、それが動物であれ機械であれ、個々の原動機により、所定の時間内にいくらの量の力学的パワーがなされるかが問題であり、したがって、特定の仕事を完了する時間は不可欠な事項である。

人間のパワーは、毎分 60 立方フィートの水 (つまり 3750 ポンドの重さ) を 1 フィートの高さへ上げる量であると見なすことができる。または、異なる高さへ上げるのであれば、フィートで表した高さとポンドで表した重さの積が 3750 となるように配分すればよい。頑強な労働者であれば、1 日 8 時間の間この比率で作業し続けるであろう。そのような労働者の 1 日の仕事は、28 800 立方フィートの水を 1 フィートの高さへ上げる量であるとすることができる。

馬のパワーは、平均して、1 分間に 352 立方フィートの水 (つまり 22 000 ポンドの重さ) を 1 フィートの高さへ上げるパワーに等しい。これはまた 5.867 人のパワーに等しい。良好な馬であれば、1 日 8 時間この比率で働き続けるであろう。そのような馬による 1 日の仕事は、168 960 立方フィートの水を 1 フィート高さへ上げる量とすることができる。

蒸気機関の馬力は技術者によって採用されている尺度であり、それは毎分 528 立方フィートの水 (つまり 33 000 ポンドの重さ) を 1 フィートの高さへ上げる量に等しい*38。この書籍では、この馬力を HP という文字で表している。

1 馬力は普通の馬 1 $\frac{1}{2}$ 頭または人間 8.8 人のパワーに等しく、蒸気機関のパワーは常にこの尺度で表されるので、馬力で表したパワーは、指定された馬力の数の 1.5 倍の頭数の馬のパワーに等しい。例えば、10 馬力の蒸気機関のパワーは、15 頭の馬が一緒に行動しているときのパワーに等しい。また、その機関が昼夜を問わず動作する場合、それぞれの馬は 24 時間のうち 8 時間しか働くことができないとすると、その蒸気機関は実際には 45 頭の馬の働きをするであろう。なぜなら、同じ仕事を行うためには、その数の馬を維持する必要があるからである。

これらすべての場合において、持ち上げられる重さは、摩擦やその他の偶発的な原因によるパワーの損失とは独立して生み出される、有用な力学的効果として考えられるべきである。その結果、これらの有用な効果を生み出すために消費されなければならない力学的パワーは、それよりはるかに大きくなるであろう。

(p.66) **機関または機械によりなされる力学的パワーを馬力の単位で求めること。**

規則：駆動力がおよぼす一様な力または圧力 (ポンド) に、その力が及ぼされて毎分移動する距離 (フィート) を掛けて、その積を 33 000 ポンドで割る。その商は、機関または機械によってなされる馬力である。

例：蒸気機関のピストンにかかる圧力が 1650 ポンドであり、それが毎分 200 フィートの速度で動くとする。そのとき、1650 ×200 = 330000、÷33 000 = 10 馬力となる。

計算式 (訳注)：

$$(\text{動力 [HP]}) = \frac{(\text{力 [lb]}) \times (\text{移動速度 [ft/min]})}{33000\ (\text{lb ft/min})/\text{HP}} = \frac{1650\ \text{lb} \times 200\ \text{ft/min}}{33000\ (\text{lb ft/min})/\text{HP}} = 10\ \text{HP}$$

円周に沿って作用する力によりなされる力学的パワーを馬力の単位で求めること。

規則：一様な力または圧力 (ポンド) にそれが動く直径 (フィート) を掛けて、その積にその毎分の回転数を掛け、そして最後の積を 10504 で割る。その商が発揮される馬力である。

例：蒸気機関の増速歯車の (ピッチ) 円周は直径 5 フィートであり、それは 840.32 ポンドの力で駆動されて、毎分 25 回転すると仮定する。そのとき、840.32 ポンド ×5 フィート = 4201.6、×25 回転 = 105040、÷10504 = 10 馬力となる。

計算式 (訳注)：

$$\begin{aligned}(\text{動力 [HP]}) &= \frac{(\text{力 [lb]}) \times (\text{移動速度 [ft/min]})}{33000\ (\text{lb ft/min})/\text{HP}} = \frac{(\text{力 [lb]}) \times \pi \times (\text{直径 [ft]}) \times (\text{回転数 [rpm]})}{33000\ (\text{lb ft/min})/\text{HP}} \\ &= \frac{(\text{力 [lb]}) \times (\text{直径 [ft]}) \times (\text{回転数 [rpm]})}{10504} = \frac{840.32\ \text{lb} \times 5\ \text{ft} \times 25\ \text{rpm}}{10504} = 10\ \text{HP}\end{aligned}$$

5.19 機械における効果の最大値

機械が最大限の効果を発揮する条件は、それを駆動する駆動力の行使により可能な力学的パワーの量について考えるか、または、推進力の消費を参照せずに、任意の機械が発揮できる力学的パワーの量について考えるかのいずれかである。これらを考慮することは両方共重要であり、それらが分離できることは稀であるが、一方の意味で最大値を達成する条件は、他方の意味で最大値を生み出すものと異なる条件を必要とする場合も生じるであろう。なぜなら、最大のパワーを発揮するように動作している機械は、また、最小の消費でそのパワーを供給しているとは限らないからである。

---

*38 (訳注) 前述のように、原書では仕事や仕事率 (動力) は常にこのように表現されているが、簡便さと明確化のために、以下では 33000 ポンド・フィート、3300 lb ft、または 毎分 33000 ポンド・フィート、3300 lb ft/min、等と記述する。

駆動力の所定の消費から最大の効果を得るためには、機械はその駆動力のすべてのパワーを受けるように適合されていなければならず、その活性度 (activity) が逃げたり無駄になったりして、機械を駆動するその全効果を発揮できなくならないようにしなければならない。そのパワーが作用する部分は、作用する力に比例しなければならず、それらの作用の速度、強さおよび方向に対応していなければならない。これらの状況は、駆動力が機械を駆動するのに必要なある特定の速度に関して、考えられなければならない。なぜなら、それぞれの種類の駆動力は、機械に対して最大の有効度で作用して最大の力学的パワーを伝達できるある特定の速度を持っているためである。機械に運動を与えるために加えられるすべての駆動力の活性度は、その作用の速度とともに減少し、そしてその一方で、ほとんどの抵抗力の大きさはそれに対抗する運動の速度と共に増加するからである (p.64 を参照)。

例えば、人間や動物は、手足に対抗する抵抗が負荷されていなくても、ある一定の速度より速く手足を動かすことはできず、また、過度の抵抗が加えられるならば、まったく動かすことができない。どちらの場合も、力学的パワーは実現されない。同様に、風や水の自然の流れもその運動の速さに限界があり、種々の機械に作用する際に、ある一定の速度で作用するときに最も効果的となる。もし、風や水の作用を受ける機械の部品が非常に速く動くならば、そのとき、その機械は流れの力の一部しか実現できない。なぜなら、風や水が止まって可動部に作用しなくなった後、風や水はそれらの部品と同じ速度で動き続けて、したがって、駆動力のパワーをすべて機械装置へ伝えるのではなく、その一部を保持し続けるであろう。

(p.67) 任意の与えられた機械で最大の効果を得るためには、抵抗力は駆動力に比例して、それらは厳密な動的平衡状態に到達しなければならない。そのときその機械は、対抗する抵抗力にその作用する距離を掛けた積が最大となる速度で駆動されることになる。

蒸気の弾性力は、それが作用できる運動の速度の点では限界があるが、その最大の速度は非常に大きく、蒸気機関のピストンがその最大の効果を発揮できるまでには、通常の動作速度よりも更にずっと速い動きをすることができるであろう。ほとんどの蒸気機関では、ピストンに作用する蒸気がシリンダへ入る時に通過する開口部を狭くすることにより、そのパワーを調整する。そのため、蒸気の駆動力はピストンに自由に作用するのではなく、限られた活性度 (activity) で作用しているだけである。開口部のサイズは限定されているため、開口部を通過してシリンダへ入る蒸気の量が既述の条件に従って最大の効果を生み出すような、ある特定のピストン速度が存在する。また、ボイラで発生可能な蒸気の量により機関のパワーが制限される場合もある。

水車の運動は、水門の開口部を通して水車の上へ投入される水の流れを制限することによっても調整される。しかしそのパワーの大きさは、川の流れが供給できる水の量とそれが落下する高さとにより制限されている。

武器における火薬の作用では、蒸気の場合とは事情が異なる。それは通常、与えられた量の火薬粉末の消費から最大の効果を生み出すような速度よりも、より速い速度で弾丸を投射する必要があるからである。そのために、比較的ゆっくりした動きで岩を爆破するのに適用されるときの火薬の力学的パワーは、弾丸を大きな速度で投射するのに使われるときよりも、はるかに大きくなる。

6　種々の条件下での蒸気の性質の記述

6.1　蒸気の性質

この主題は十分に実験的調査がなされていないので、蒸気の主な性質の標準として確立されるべきその値の正確さについて、私たちは十分な自信をもっているわけではない。以下の記述は、許容範囲内で認められていると思える事項や、他の結論と比較して最も可能性の高いと考えられる推測を含んでおり、それらは、これまで行われていた以上に正確な実験で検証される必要がある。そのような信頼を置ける結果を得られるような実験を行うことは、極めて困難である。

蒸気は、熱を浸透させて空気状態つまり弾性流体の状態にされた水である。日常の言語では、蒸気という単語は熱湯の表面から出て空気中を雲状に上る熱い白い湯気を表しているが、蒸気が不透明度で雲状の外観を呈するのは、単にそれが普通の空気との混合物となっていることに起因するものである。蒸気が大気と接触せずに密閉容器に入れられているとき、蒸気は透明の弾性流体となり、その熱と温度に応じて、より大きい、またはより小さい弾性力と密度を持つ。蒸気が非常に希薄になって小さい弾性力と低い温度しか持たないとき、それを vapour と呼ぶのが普通である。

蒸気の性質の明確な概念を得るためには、次のように考えなければならない。つまり、蒸気は、通常の液体状態より更に多量の熱を含んだ水であり、水に熱を過剰に含ませることによりその体積が膨張して希薄化し、液体状態での体積よりけた外れに大きい体積を占めるようになったものである。また、体積の膨張は気体状態の弾性の性質に伴うものであること、そのため、蒸気は常により大きな体積を占めようとすること、その結果、割り当てられた任意の空間の境界となる面に対して、蒸気は常にある圧力を及ぼすこと (p.53 を参照) を考慮しなければならない。

この主題についてこのような観点に立ち、下記の蒸気の特性について考える。(1) それ構成する水の量と比べた蒸気中の熱量。(2) 所定体積の蒸気に含まれる水の量、または所与の弾性と温度で所定重さの蒸気が占める体積、つまり、言い換えると蒸気の密度。(3) また、種々の温度と密度条件での蒸気の弾性力、つまり蒸気が膨張してより大きな体積を占めようとして及ぼす圧力。これらの種々の量は、状況に応じて大きな変化を受けるが、すべての場合では、それらは互いにある一定の関係を保持するので、その関係をよく理解して、蒸気機関の動作中にその容器内で何が生じるかについて正しい概念を持つ必要がある。

6.2　蒸気の熱量

(p.68) 蒸気中の熱量は、肌で感じたり温度計で示されたりする以上にはるかに大きい値となる。すべての物質は固有の性質として熱を含んでおり、その熱量を推測するための満足な方法はないが、それは物体に固有のものであり、またある程度増減させることができる。そしてそのような増減に伴う効果を観察することにより、いくらかの確かな推論を引き出すことができる。その一つは、熱は物体内に熱さとして姿を消して、感知不能または不可視となって物体内に潜伏させることが可能なことであり、そのとき、熱は温度計に影響を与えなくなる。

液体に伝えられる熱の追加がその熱さ (温度) の増加を引き起こさなくなるとき、それは液体に、気体の弾性 (aeriform elasticity) という新しい性質を付け加える。物体が固体の状態から液体の状態へ変化し、さらに、その液体状態は気体または弾性流体の状態へ変えられるのは、熱の一部が物体内でこのように潜伏して感知不能となることに起因するのである。これらの効果を生み出す熱の部分は、流動性の潜熱および弾性の潜熱と呼

ぶことができ、そして、そのように熱が液体内で潜熱に変わるときは常に、熱が見えなくなるという作用のなかで、その液体に気体の弾性の性質を付与しなければならない[39]。

既知量の蒸気と既知量の冷水とを混合する実験が行われた結果、蒸気は、潜熱状態で保持された驚異的な量の熱を含んでいることが示されており、その熱は忠実に再現でき、またより冷たい物体へ伝えることができる。蒸気が火傷 (やけど) を引き起こすパワーを持つことから、それは沸騰している水よりはるかに熱いと思わされているが、蒸気の温度はそれを発生する水よりも高くはないので、これは間違いである。それでも、やかんの注ぎ口からの蒸気を大量の冷水に入れて混ぜるならば、その蒸気は凝縮して水に変わり、蒸気状態の 1 ポンドの水がこのようにして凝縮したとき、それは混合した冷水塊を加熱することができ、蒸気状態の 1 ポンドの水の代わりに、960 ポンドの沸騰している熱湯を投入したかのように冷水を加熱する。

所定の重さの弾性蒸気の中に潜伏しているとされる熱は、等しい重さで等温度の (つまり蒸気と等量の顕熱を含む) 液体の水以上に蒸気中に含まれる熱である。これは、**弾性の潜熱**と呼ぶことができる。

たとえば、気圧計の水銀柱が高さ 30 インチであるとき、大気に開放された容器内で沸騰している水から発生する蒸気は、大気と同じ弾性を持たなければならず、また、華氏温度計で 212 度の温度となるであろう[40]。しかし、蒸気は、このように顕在的に (温度に) 現れた熱に加えて、自身の 960 倍の重さの水の温度を (例えば 211 度から 212 度まで) 1 度上げる量の熱を、または 96 倍の重さの水を (202 度から 212 度まで) 10 度加熱する量の熱を、その中に隠された潜伏状態で含んでいる。

(p.69) その蒸気が外気中へ立ち上がって沸騰している水は 212 度、つまり蒸気と同じ温度である。蒸気と沸騰している水との性質の違い、つまり、その気体状の性質と、その体積の驚異的な増加 (この場合は 1700 倍) とは、沸騰している水が弾性を持つ瞬間にその中に潜伏する熱がもっぱらの原因である。

その熱は、水が同時に気体状態にならない限り潜熱となることはできない。液体から気体状態への変化は必然的に体積の大幅な増加を伴うので、水が限られた空間内に閉じ込められて体積の膨張が妨げられている間は、そのような変化は起こることができない。

たとえば、水が大きい密閉容器に閉じ込められて、それから生じる蒸気が逃げることができず、限られた狭い空間に保持されている条件の下で、その水に熱が伝達されると仮定する。その蒸気の弾性は水に圧縮力を及ぼし、体積が増大しようとする傾向が圧縮の力に打ち勝てない限り、水が体積を増加することはできないであろう。この状況下では、圧縮された水に伝達される熱は水の温度を上げるであろうが、蒸気に変換される少量の水の中の熱を除けば、潜熱となることはないであろう。そして熱が潜熱となってより多くの水を蒸気に変えようとするために、水は、それと同じ温度の蒸気により及ぼされる圧力と同じ圧力で、その占有空間の境界面に圧力を及ぼすであろう。水をその温度にまで上げて水を加圧するのに必要な熱量は、同じ重さの同じ力の蒸気が必要とする熱量よりはるかに少ない。なぜなら、その水の中には顕熱があるだけであるが、蒸気には顕熱に加えて潜熱がなければならないからである。

[39] (訳注) 本書が書かれた 1827 年当時は熱の元素説 (カロリック説、熱素説) の全盛期であり、固体・液体・気体間の遷移や膨張・収縮などのすべての状態変化は、普通の元素と熱素との引力・斥力で説明されていた。そこでは、熱素は質量を持たず、熱素粒子間で反発し合って膨張や流動性の元となり、他の物質の粒子と結合したり引力を及ぼし合ったりするとされている。

[40] この書籍では、温度はすべて華氏の水銀温度計の温度で表される。その温度計がイングランドで最も一般的に使われているからである。華氏 32 度は氷点、つまり氷が水に溶け始める温度であり、212 度は水の沸点、つまり、気温が華氏 62 度で気圧計の水銀柱の高さが 30 インチであるとき、大気圧に開放された容器内で沸騰している水から発生する蒸気の温度である。その温度計の管は一様な口径であり、これら二つの確認された点の間の長さが 180 区間に等分割され、これが華氏の温度計の目盛りを形成する。212 度の上方へも、水銀温度計が示すことができる最高温度 (約 680 度で水銀は沸騰して蒸気になる) まで、同じ等分線が必要に応じて拡張される。

水に熱を与えることにより作り出される効果は、潜熱となって弾性による流動性と体積の増加を生み出すか、または、膨張の傾向が強制的に制限されている場合は、熱の追加は潜熱とならずに圧力を生み出して温度を上げるかのどちらかである。ほとんどの場合、これらの両方の効果が組み合わされて同時に発生する。伝達された熱の一部は潜熱となって膨張させ、他の部分は顕熱として残って弾性力を生み出す。

蒸気のための少しの空間だけを残して水で満たされた大きな密閉容器内で、その水が加熱されると、熱が伝えられて発生した蒸気は容器内に閉じ込められて蓄積するであろう。そのとき、閉じ込められた蒸気の弾性力と密度およびその温度は、ある時間経過に伴って増加するであろう。同じ空間にさらにいっそう多くの蒸気が閉じ込められ蓄積される結果、弾性と密度が増加し、蒸気は、もし閉じ込められていなければその熱が潜熱となって膨張したはずの体積まで、膨張することができない。これらの制限された作用の状況下では、水に伝えられる熱の一部だけが、その水が蒸気になるときの潜熱になることができる。潜熱となるその熱は、その熱を吸収する水を膨張させて、閉じ込められた空間が許す範囲で体積の大きい蒸気を形成する。潜熱とならない残りの熱は顕熱のまま残り、蒸気の温度と弾性を増加させるる。なぜなら、蒸気がその空間が許容する以上に体積を増加させることができない限り、熱が潜在状態で蒸気の中に存在する余地はないからである。

蒸気の中で熱が潜熱状態で隠される現象は、湿ったスポンジを手で強く握るときに、その中に含まれている水に例えて説明できるであろう。この状態のスポンジに水が接続されると、スポンジの外見は濡れているように見えないにもかかわらず、スポンジはある量の水を吸収し、それを内部に保持するであろう。さらに多くの水が加えられると、スポンジは水過剰の状態となり、そのとき、水の過剰分が目に見える水分としてその表面に現れて来るであろう。しかし、この湿ったスポンジを (握った手を緩めて) その圧縮から解放すると、スポンジは体積が大きくなって水を吸収する容量が増大し、(表面に現れた) 目に見える水分はすべて物質内へ入って行き、そしてその表面は再び乾いた外観を呈するようになるであろう。

(p.70) そのため、蒸気が圧縮されているときは、その中にある量の潜熱しか持つことができず、蒸気が含む残りの熱は顕熱となるであろう。しかし、蒸気が圧縮状態から解放されて体積が膨張できるようになると、その顕熱の一部はその膨張中に潜熱となるであろう。このことから、その蒸気の膨張は、顕熱から潜熱へ熱がその性質を変えることにより引き起こされる、と合理的に推論できるであろう[*41]。

6.3 蒸気の熱量の標準値

ある所定重さの蒸気は、その温度が華氏目盛のゼロに降下するまでその蒸気から熱を抽出できたとしたら、その 1172 倍の重さの液体の水の温度を華氏 1 度上昇させるだけの熱量[*42]を含んでいることが、最良の実験により証明されているように見える。しかし、これは決して実際ではなく、蒸気に変換される水の温度 (または蒸気が凝縮されるときの水の温度) が 1172 から減算されなければならない。そして、その残りの値が、所定重さの蒸気が同じ重さの液体の水の熱量以上に含んでいる熱量であり、その値の重さの水を華氏 1 度だけ温めることができる量である。

例えば、62 度の水 1 ポンドを任意の必要な温度の蒸気 1 ポンドに変換するためには、(1172 - 62 =) 1110 ポンドの水を 1 度温める量の熱量がその中へ投入されなければならない。または、任意温度の蒸気 1 ポンドを 62 度の水 1 ポンドに凝縮して変換するためには、1110 ポンドの水の温度を、たとえば 61 度から 62 度まで 1 度上昇させる量の熱が、その蒸気から取り除かれなければならない。

もし、熱の尺度としてこのように用いられる水の量がより少なくなるのであれば、その水の温度上昇は反比例して大きくなると考えられる。例えば、水 555 ポンドが加熱されるとすると、温度上昇は 60 度から 62 度までの 2 度となり、ま

[*41] (訳注) ここでの説明は、当時支配的であった、アーヴィンからラヴォアジェ、ラプラスに至る熱素理論 (膨張の潜熱理論) に基づいている。

[*42] (訳注) つまり、後年の英国熱量単位で 1172 Btu の熱量。

た、水 111 ポンドが加熱されるとすると、温度上昇は 52 度から 62 度までの 10 度となる、等々。

蒸気の顕熱と潜熱の和は、上記の数値 1172 で表されるように、すべての場合で一定量であることが想定され、従って、温度 212 度の蒸気はその中に (1172 - 212 =) 960 の潜熱を保有し、温度 275 度の蒸気は (1172 - 275 =) 897 の潜熱を保有する。再度、温度 62 度の温度に戻ると、それは (1172 - 62 =) 1110 の潜熱を保有する。したがって、蒸気の温度と弾性が増大するにつれて、潜熱は減少することになる。その逆もしかりである[*43]。

この主張では、所定重さの蒸気に含まれる熱量は、その蒸気の温度がいくらであっても同じであると仮定されている。例えば、温度 212 度の蒸気 1 ポンドが凝縮して温度 62 度の水 1 ポンドになるためには、同じ重さの蒸気が温度 275 度、または他の温度であったとした場合に失うのと同じ量の熱を失わなければならない[*44]。この主題について行われた実験は、意図されたほど満足できるものではなく、種々の弾性および温度における蒸気の熱と密度についての、完全かつ正確な一連の実験が強く望まれる。

6.4 蒸気の密度

(p.71) 蒸気の密度は、所定体積の蒸気に含まれる水の量に依存する。蒸気に変えるために水に伝えられる熱は、体積の膨張と蒸気内の弾性力のみを生み出し、その蒸気を構成する水の重さを変更することはない。したがって、任意の質量または与えられた重さの水が与えられた条件のもとで蒸気に変換されることによって、どの程度膨張したか、つまり体積がいくら増加したかを調べればよい。蒸気の与えられた重さを物質の量として議論するとき、熱それ自体には重さがないので、蒸気の重さは蒸気状態にある所定の水の重さであると考える

[*43] (訳注) この現象の記述と解釈は誤っている。正確な熱量 (エンタルピー) は下表のとおりである。

ヤード・ポンド法					SI			
温度	圧力	比エンタルピー			温度	圧力	比エンタルピー	
		飽和水	飽和蒸気	潜熱			飽和水	飽和蒸気
°F	lb/in^2	Btu/lb			℃	MPa	kJ/kg	
0	0.0220	0.0*	1094.8	1094.8	-17.778	0.00015176	-75.9224*	2468.8403
32	0.0886	32.6*	1108.9	1076.3	0.000	0.00061080	-0.0416*	2501.5513
62	0.2749	62.7	1122.0	1059.3	16.667	0.00189567	69.9182	2532.1010
212	14.70	212.9	1183.9	971.0	100.000	0.10132526	419.0647	2676.0088
275	43.96	276.9	1205.7	928.8	135.000	0.31307507	567.6766	2726.5881

* ：気相 (蒸気) と平衡する固相 (水) の値

実在の蒸気等に対する状態式および内部エネルギー (またはエンタルピー) の表示式は、かなり複雑な表示式 (実験式) となる。実用的には、日本機会学会蒸気表等を用いればよい。

[*44] これは、クレメント (Clement) 氏が彼の実験から引き出した結論であり、ワット氏も同様の考えを持っていた。実際の値は、上記の主張から大きくかけ離れていないことが確認されているが、下記の理由で、それは厳密には正しくないと考えることができる。すなわち、同じ物体では、それが密である場合より希薄になった場合の方が、熱容量は大きくなる。または、言い換えれば、所定重さの物質で所定の温度変化を生じるために必要な熱量は、その物質がより大きい体積を占めているときにより大きな値となるからである。

上記の主張によると、液体の水の状態または蒸気の状態のいずれであるか、また、その蒸気の密度がいくらであるかに関わらず、同じ重さの水はすべての状況下で同じ熱容量を持つことになる。しかし、実際には、蒸気は、その密度がより大きくなると、より小さい熱容量を持つようになるのである。密度、弾性、温度のある値となる状態での蒸気の熱容量が、他の状態での水または蒸気の熱容量と比較して求められたことはない。しかし、物体がより希薄になってより大きな空間を占めるほど、その熱容量はより大きくなり、任意の弾性流体は、体積が膨張するほどより大きな熱容量を持つという一般的法則があり、蒸気もそれに従うことが知られている。非常に高温で高弾性の蒸気が大気中へ噴出して膨張し、大気と同じ弾性になるとき、その温度は、その弾性の蒸気に対応する沸騰水の温度 (212 度) より、はるかに低くなるであろう。また、普通の温度の空気が密閉容器内へ押し込まれると、その圧縮によってその空気はより温かくなる。または、その空気がその閉じ込められていた容器から噴出させられると、膨張した空気の流れは、周囲の空気よりもはるかに冷たくなる (訳注：主題の熱容量の体積依存性とこの気体の断熱膨張との関係について、著者がどのように考えているのか不明である。いずれにしても、正確な議論とは言えない)。

べきである。

明らかに、非常に高温で高弾性の蒸気は、与えられた空間内に詰め込まれた大量の熱と水で構成されているはずであり、低温で低弾性の蒸気は、等しい空間内により少量の熱と水が含まれているはずである。この状況の違いは、**プレナム (plenum)** と**真空 (vacuum)** の二つの相対的な状態を構成し、それらの用語は蒸気機関に関連して用いられている。プレナムとは、蒸気の形の水と熱で満たされた空間であり、蒸気が密集しているために、余分の蒸気が出て行こうする空間である。一方、真空という用語は蒸気の形の水をほとんど含まない空間を意味し、その占める空間へ他の物質が侵入することに、それほど強い抵抗を示さない空間である。これらの用語は、熱いおよび冷たいと同様に、互いに相対的なものでしかない。

蒸気は弾性流体であるので、その所定の質量は、占有可能な空間に応じて、または圧縮されてその空間内に閉じ込める力に応じて、任意の"割り当て可能な体積"を持つことができる。弾性力の強さは蒸気がその空間を占める占め方を示しているので、蒸気がその境界面に及ぼす弾性力に注意する必要がある。弾性はその温度にも依存するので、その状況をも考慮しなければならず、したがって、密度、弾性および温度の 3 者が、お互いの関連の中での取り上げられなければならない。

6.5 種々の温度での蒸気の弾性力

ボイラなどにおいて、蒸気と水が飽和して平衡した状態で熱を受けて、蒸発の進行により蒸気の密度が増加するとき、その弾性の増加に関する法則は、ワット氏、ロビソン博士、ベタンクール (Bettancourt) 氏、サザン (Southern) 氏、おとびその他の人々が行った多くの実験により確認されている。それらは非常に良く合致するので、その精度について大きな確信が持たれている。サザン氏により行われた実験は最も完全であり、非常に正確な温度計を用いて行われているので、それが本書でも採用されている。

これらの実験の特徴を理解するために、U 字形のサイフォン気圧計つまりガラス製の逆向きサイフォン管を考え、その U 字管の下部が水銀で満たされているとする。その一方の脚部は上端で密閉されて空気が排除され、完全な真空となっていると仮定する。そのとき、そこに含まれる水銀の上部には、自身の重さを除いて何の圧力も作用することはない。サイフォンの他方の脚部は、密閉容器またはボイラの内部に繋がれていて、その密閉蒸気内部では、熱を伝達することにより水から蒸気が生成され、したがって、蒸気はそれに繋がった脚部の中の水銀表面を押すであろう。一方、他方の脚部の水銀には対抗する圧力が作用しないので、その結果、蒸気は一方の脚部内で水銀を押し下げて、他方の脚部内へその重さに対抗してそれを押し上げるであろう。水銀が 2 本の脚部内で上昇する高さの差は、蒸気の弾性の尺度となるであろう。

(p.72) 例えば、その蒸気ボイラ内で完全な真空が存在するとすれば、そのとき、両脚部の水銀はどちらも押されていないので、同じ高さになるであろう。しかし、その水が加熱されて蒸気を発生し、その中に留まって蓄積して、その温度が 212 度まで上昇して蒸気が大気圧の空気と同じ弾性を得たとすると、そのとき、その蒸気はその作用を受けている側の脚部の水銀を押し下げ、それを他方の真空の脚部の中へ押し上げ、その二つの脚部の高さの差は、普通の大気圧の気圧計と同じ 30 インチになるであろう。全ての場合で、二つの脚部の水銀の表面間の高さの差はインチ単位で測定され、種々の温度に加熱蓄積されたボイラ内の蒸気が持つ弾性力を表すであろう。

蒸気の普通の一般的な理解は、"常に火傷 (やけど) するくらいに熱い"ということである。それは事実として観察されているからであるが、それは、水の上に大気圧が作用して水を液体状態に保持している限りとの条件が付く。そのとき、水が蒸気となって希薄化しようとする傾向がその圧力に打ち勝つようになるには、水の温度は 212 度にまで上げられることが必要であるからである。密閉容器内に一部の水を閉じ込めるとき、その水の上の空間から空気が排気されて真空となり、水自身の重さによる圧力を除いて、水を他のすべての力から開放したとすると、そのとき、いくらかの蒸気が水から上昇して上の何もない空間を満たすであろうし、そ

の蒸気の弾性力と密度は、温度に依存するであろう。

水の温度がいくらであっても、対応する弾性の蒸気を生成するであろう。もし、氷結する程度に低温であればそのときの蒸気の弾力性は非常に小さいであろうが、それは、最初の表 (表 5) で示す進行に応じて温度とともに増加するであろう。したがって、液体の水を入れた密閉容器内で、完全な真空を作ることは不可能である。なぜなら、その水がその温度に応じて、多少なりともある弾性の蒸気を生じるからである。

サザン (Southern) 氏は、彼の多数の実験の比較から、種々の温度における水で飽和した蒸気の弾性を算出する方法を考案した。サザン氏の方法は次の規則で表され、実験結果と非常によく一致する結果が得られるであろう。

任意の温度における蒸気の弾性を求めること。ただし、温度は華氏温度で表され、弾性はその蒸気が押し上げる水銀柱の高さ (インチ) で表されるものとする。

規則：温度 (華氏度) に一定の値 51.3 度を加算し、その加算した温度の対数を (対数表から) 求める。その対数値に定数 5.13 を掛け、その積から定数 10.94123 を減算する。次に、対数表を用いて、対数の値がその残差になる真数を求めると、その真数は求める水銀柱高さ (インチ) より $\frac{1}{10}$ インチ小さい値である。したがって、その真数に $\frac{1}{10}$ インチを加算することにより、蒸気が支える水銀柱の適切な高さ (インチ) が求まる[*45]。

例：温度 212 度における蒸気の弾性はいくらか ?

212 度 + 51.3 度 = 263.3 度、その対数は 2.42045 であり、その値 ×513 = 12.4169 である。これから定数 10.94123 を引くと残りは 1.47567 であり、この対数値に対応する真数は 29.9 インチである。そして 0.1 インチを加えて、求める弾性の値として 30 インチ水銀を得る。

計算式 (訳注)

$$\begin{aligned}&(\text{蒸気の弾性 [inHg]}) = h + 0.1\\ &\text{ただし}\qquad \log h = \log\{(\text{温度 [°F]}) + 51.3\} \times 5.13 - 10.94123\end{aligned}$$

または

$$(\text{蒸気の弾性 [inHg]}) = \frac{\{(\text{温度 [°F]}) + 51.3\}^{5.13}}{87344000000} + 0.1$$

となる (訳注終わり)。

この規則を逆に用いて、**任意の与えられた弾性を持つ蒸気の温度を求める**ことができる。

弾性を表す水銀柱の高さ (インチ) から $\frac{1}{10}$ インチを減算し、減算した高さの対数を取り出し、それに定数 10.94123 を加え、そしてその和を定数 5.13 で割る。対数表により、対数の値がその商になる真数を求める。その真数は求める温度より 51.3 度高い値であるので、その真数の値から定数 51.3 を減算することにより、求める温度 (華氏度) が得られる。

例：(p.73) 弾性力 120 インチ水銀の蒸気の温度はいくらか ?

120 インチ - 0.1 = 119.9 インチ、この対数は 2.07882 であり、+ 定数 10.94123 = 13.02005 、÷定数 5.13 = 2.53802、この商の対数となる数は 345.2 度である。これから一定温度 51.3 度を差し引いて、求める温度 293.9 度を得る。

計算式 (訳注)

$$\begin{aligned}&(\text{温度 [°F]}) = t - 51.3\\ &\text{ただし}\qquad \log t = \frac{\log\{(\text{蒸気の弾性 [inHg]}) - 0.1\} + 10.94123}{5.13}\end{aligned}$$

または

$$(\text{温度 [°F]}) = 135.8 \times \{(\text{蒸気の弾性 [inHg]}) - 0.1\}^{0.1949} - 51.3$$

[*45] 定数 51.3 を加算した温度の対数に 5.13 を掛ける効果は、その加算された温度を 5.13 乗することであり、それから定数 10.94123 を差し引くことは、そのべき乗値を定数 ($10^{10.94123}$ =) 87 344 000 000 で除算することに同じである。この除算から得られる商に定数 $\frac{1}{10}$ インチを加算したものが求める弾性 (インチ水銀柱) である。

表 5　種々の温度での飽和蒸気の弾性力 (沸点以下)

温度		蒸気の弾性 (絶対圧)			蒸気の弾性 (負圧)		
˚F		inHg	ftAq	lb/in^2	inHg	ftAq	lb/in^2
32	氷点	0.18	0.20	0.09	29.82	33.67	14.61
42		0.25	0.28	0.12	29.75	33.59	14.58
52		0.35	0.39	0.17	29.65	33.48	14.53
62		0.50	0.56	0.24	29.50	33.31	14.46
72		0.71	0.80	0.35	29.29	33.07	14.35
82		1.01	1.14	0.50	28.99	32.73	14.20
92		1.42	1.60	0.70	28.58	32.27	14.00
102		1.97	2.22	0.97	28 03	31.65	13.73
112		2.68	3.02	1.31	27.32	30.85	13.41
122		3 60	4.06	1.76	26.40	29.81	12.94
132		4.76	5.37	2.33	25.24	28.50	12.37
142		6.22	7 02	3.05	23.78	26.85	11.65
152		8.03	9.06	3.93	21.97	24.81	10.77
162		10.25	11.57	5.02	19.75	22.30	9.68
172		12.94	14.60	6.34	17.06	19.27	8 36
182		16.17	18.25	7.92	13.83	15.62	6.78
192		20 04	22.62	9 82	9.96	11.25	4.88
202		24.61	27.78	12.06	5.39	6 09	2.64
212	沸点	30.00	33 87	14.70		大気圧	

表 5、6 は、サザン氏の方法により計算されたものである。各表の最初の列は蒸気の温度を華氏温度で示したものであり、他の 6 列は、その蒸気が蓄積されてそれらの温度まで加熱されたときの弾性を表している。その弾性は、異なる目的での使用に便利なように、いくつかの単位で表されている。

その第 2 列は、蒸気が支える水銀柱の高さ (インチ) である。第 1 および第 2 列の数値は前記の規則により計算されている。第 3 列は、水銀は水の 13.548 倍の重さであるとして求めた対応する水柱の高さであり、水銀柱の 1 インチは水柱の 1.129 フィートに相当する。第 4 列は、常衡ポンドで表した圧力であり、蒸気を入れた容器の内表面の 1 平方インチあたりこの力が作用する。1 立方フィートの水は 62.5 ポンドの重さであり、したがって、1 インチ角で高さ 1 フィートの水柱の重さは 0.434 ポンド、または、1 インチ角で高さ 1 インチの水銀柱の重さは 0.49 ポンドである。

残りの三つの列は、種々の温度での蒸気の弾性と大気の圧力との差を示し、大気の圧力は、蒸気を入れた容器を内側へ向かって、水銀柱 30 インチ高さの一定の力で押すと仮定している。

もし、蒸気の弾性が大気圧以下であれば、外気は蒸気が占有する空間へ入ろうとする力を及ぼし、容器の側面を内側へ押して破壊するように作用するであろう。その力は、表 5 の最後の 3 列で異なる単位で示されている。

(p.74) 蒸気の力が大気の力を超えるとき、含まれている蒸気は容器内から外気中へ出るような力を及ぼし、表 6 の最後の 3 列で示されている力で、容器を開いて破裂させるように作用するであろう。

上記の表で、1 気圧の弾性増加を生み出すのに要する温度上昇は、温度および弾性が大きくなるにつれて連

表 6　種々の温度での飽和蒸気の弾性力 (沸点以上)

温度 °F		蒸気の弾性 (絶対圧) in	ft	lb/in^2	蒸気の弾性 (ゲージ圧) in	ft	lb/in^2
212	1 atm	30.0	33.87	14.70	大気圧		
222		36.32	41.00	17.78	6.3	7.13	3.08
232		43.6	49.22	21.36	13.6	15.35	6.66
242		52.2	58.93	25.57	22.2	25.06	10.87
250.2	2 atm	60 0	67.74	29.40	30.0	33.87	14.70
252		61.9	69.87	30.33	31.9	36.00	15.63
262		73.0	82.40	35.77	43.0	48.53	21.07
279		85.8	96.87	42.04	55.8	63.00	27.34
275	3 atm	90.0	101.61	44.10	60.0	67.74	29.40
282		100.3	113.25	49.16	70.3	79 38	34.46
292		116.7	131.75	57.18	86.7	97.88	42.48
293.9	4 atm	120.0	135.48	58.80	90.0	101.61	44.10
302		135.2	152.60	66.22	105.2	118.73	51.52
309.2	5 atm	150.0	169.35	73.50	120.0	135.48	58.80
312		156.0	176.10	76.44	126.0	142.23	61.74
322		179.3	202.40	87.85	149.3	168.53	73.15
322.3	6 atm	180.0	203.22	88.20	150.0	169.35	73.50
332		205.4	231.80	100.60	175.4	197.93	85.90
333.7	7 atm	210 0	237.09	102.90	180.0	203.22	88.20
342		234.4	264.60	114.80	204.4	230.73	100.10
343.8	8 atm	240.0	270.96	117.60	210.0	237.09	102.90

続的に減少している (表 7)。このことから、閉じ込められた蒸気の弾性力は、温度計で測定されるその温度より、より急速に増加することが分かる。

この状況は多くの立案者をミスリードしてきた。彼らは、温度と熱量、あるいは単なる圧力による力と強制的な運動つまり力学的パワーとを区別せず、低圧蒸気を用いるより高圧蒸気を用いる方が、より少ない熱量でより大きな力学的効果を生みせると考えた。

6.6　蒸気の密度の標準値

(p.75) 開放容器内で水を沸騰させたとき、そこから発生する蒸気は大気と同じ弾性力を持たなければならない。この弾性力は天候により変わるが、平均すると、表面 1 平方インチあたり 14.7 ポンドの力、または鉛直高さ 30 インチの水銀柱の重さに等しい力で押していると考えられている。この状況下での蒸気の温度は温度計目盛りの基準点の一つであり、華氏目盛りの 212 度とされている。

表 7　弾性増加 1 気圧に対応する温度上昇

	˚F		˚F		˚F			
From	32	to	212	is	212	for the	first	atm.
	212		250.2		38.2		second	
	250.2		275		24.8		third	
	275		293.9		18.9		fourth	
	293.9		309.2		15.3		fifth	
	309.2		322.3		13.1		sixth	
	322.3		333.7		11.4		seventh	
	333.7		343.8		10.1		eighth	

弾性力が水銀柱 30 インチで温度が華氏 212 度となるときの蒸気の体積は、同じ重さの純粋な液体の水の体積の 1700 倍であると考えられている。その水の温度または水が受ける圧力は重要な条件ではないが、それは華氏 62 度であり、圧力は大気圧であると仮定されている。

温度 62 度における純水 1 立方フィートの絶対重さは、新しい帝国規格 (Imperial standard) に従うと 62.321 ポンドであるが、普通の水 1 立方フィートは 62.5 常衡ポンドの重さまたは 437500 グレーン[*46]の重さであるとすることができ、上の状況での蒸気 1 立方フィートの重さは、÷1700 より 257.4 グレーンまたは 0.03676 ポンドとなる。また、そのような蒸気 1 常衡ポンドの体積は 27.2 立方フィートとなる。

この値を、標準的な弾性および温度での蒸気の密度の基準値として、種々の弾性や温度に対してその密度がどのように変化するかを表す法則について、検討することにしよう。ただし、この法則を正確に述べることが可能となるためには、この主題に関するさらなる実験が望まれる。

6.7　種々の条件での蒸気の密度の法則の可能性

空気についての実験結果から、その温度が変化しない条件のもとでは、すべての弾性流体の弾性は密度つまり所定体積内の質量に比例すると推測されてきた。蒸気も同じ法則に従うと考えられる。

この仮説を説明するために、温度 212 度で水銀柱高さ 30 インチの圧力を支える弾性の蒸気 1 立方フィートがあるとする。それは $\frac{1}{1700}$ 立方フィートの水、つまり上記のように 257.4 グレーンの水を含むであろう。この蒸気が更に 1 立方フィート余分の空間へ入ることが許されたならば、そのときその蒸気は 2 立方フィートの空間を占めて 2 倍の空間に同じ質量が拡散しているので、その密度は必然的に最初の半分の大きさになるであろう。

その蒸気の拡張中に、その温度は低下して、212 度を大きく下回るであろう。なぜなら、同じ量の熱がより大きな空間を占めるとき、それは同じ量の物質の中で一定の温度を維持することはできないためである。もし、より多くの熱が蒸気に伝達されて、温度を 212 度に回復するのであれば、上記の仮定に応じて、そのときその蒸気の弾性力は、正確に最初の半分の値、つまり高さ 15 インチの水銀柱を支えることができる値になるに違いない。このことは、著者の知る限りの実験では証明されていないが、そのことを疑う理由はない。

[*46] (訳注) 1 pound(lb) = $\frac{1}{2240}$ ton(t) = $\frac{1}{112}$ hundredweight(cwt) = $\frac{1}{28}$ quarter(qt) = $\frac{1}{14}$ stone(st) = 16 ounce(oz) = 256 drachm(dr) = 7000 grain(gr)

上記の仮定の逆の場合を考えると、次のようになる。1 立方フィートの蒸気が $\frac{1}{2}$ 立方フィートの空間に圧縮されて、その密度が 2 倍になるとすると、そのとき、蒸気の温度は上昇して 212 度を大きく超えるであろう。しかしこの場合、密度を下げることなく、元の温度に回復することはできないであろう。もし温度を下げるために蒸気から熱を取り去ると、蒸気に含まれる水の一部が直ちに凝縮または凝結して、液体状態に戻るであろう。なぜなら、蒸気が元々含んでいたほとんどすべての熱は、どんな密度や弾性の状態であっても、すべての水を気体状態に維持するために本質的に不可欠であるからである。

全ての永久弾性流体[*47]は、同じ温度変化により共通して同じ影響を受けるということが、十分に確認されている。このような温度変化により流体の弾性を変化させるのか、体積を変えるのかに関わらず、普通の空気、炭酸ガス、水素ガスのいずれであっても、永久弾性流体でさえあれば、その同じ温度変化により同じように弾性が増加し、同じように体積が膨張する。水の蒸気が永久弾性流体の特性を保持している限り、つまり、そのいかなる部分も凝結または凝縮して水になることなく、同じ量の弾性流体に留まっている限り、それは同じ法則に従う可能性がある。これは、水がそれ自身の熱を受け取るという自然の性質の結果として吸収する以上に (訳注：つまり蒸発の潜熱以上に)、多くの熱が蒸気に加えられている場合に当てはまるであろう。そのとき、そのような蒸気は永久弾性流体のように振る舞い、その蒸気から少しでも凝縮して液体を作るには、その蒸気から更に多くの熱が除去されなければならない。

(p.76) 水を蒸気に変換するために水に熱が伝えられるとき、その水の各部分ごとに気体の状態になると考えることができ、熱の一部を取得した瞬時にその熱が潜熱となることにより、それがその部分の水を気体状態にするであろう。この状態では、蒸気は凝縮可能な性質の蒸気であり、少しでも熱を取り除くと若干の結露を生じて液体となるであろう。

蒸気が水から発生した後、その蒸気に更に水 (および蒸気) を追加することなく、任意の熱量だけを追加して伝達することもできる (訳注：過熱蒸気の意味)。その蒸気の体積が変わらないのであれば、この追加の熱は蒸気の密度を増やさず、その温度と弾性だけを上昇させるであろう。一方、水から蒸気を発生させるときは、それに対応する熱を追加しない限り、自然に発生する蒸気量を超えて更に多量の水を蒸気に含ませることはできない。なぜなら、蒸気が水から自然に発生している状態では、蒸気はいわば水で飽和していて、それ以上の水分を溶かして保持することができないからである (訳注：飽和蒸気の意味)。液体の水と弾性蒸気との間には中間状態は存在せず、その結果、水で飽和した蒸気から熱の一部を取り去ると、対応する量の蒸気が水に凝結または凝縮されなければならない。

水で飽和している蒸気の弾性と温度は、その密度とともに必ず増加しなければならない。なぜなら、より多くの熱が伝達されるとき、より多くの水が蒸気に変換されねばならず、その増加量が同じ空間に閉じ込められるならば、それはより高密度で高弾性となり、その温度は上昇しなければならないからである。しかし、蒸気に熱が過剰に加えられて永久弾性流体の性質を持つようになる (訳注：つまり過熱蒸気になる) と、熱の追加はその弾性だけを変化させ、その体積が変わらない限りその密度に影響することはないであろう。

蒸気の弾性と密度を支配するすべての条件の明確な考えを得るために、二つのケースを考えなければならない。すなわち、その一つは、熱を過剰に加えて、そのために永久的な弾性流体の性質を持つようになった、最も簡単な蒸気のケースである。そのときは体積は同じままで、熱の追加によるその弾性の増加には密度の増加は伴わない。もう一つは、蒸発できるだけの水を蒸気が含むことができる場合のように、熱の追加による弾性の増加が密度の増加を伴う複雑なケースであり、そのため、このケースでは蒸気は水で飽和されている。その

[*47] (訳注) 凝縮しない気体の意味。

単純なケースは複雑なケースに含まれるので、まず最初に単純なケースが検討されるべきである。直接実験されたことはないが、熱を過剰に加えられた蒸気は空気やその他のすべての弾性流体と同じ膨張の法則に従う、と考えることができるあらゆる理由がある。直接的な証拠は存在しないが、それは正しい事実であると考えることができる。

6.8 空気の熱膨張の法則

普通の空気の熱による膨張の法則は、ゲイリュサック氏、ダルトン氏やその他の人々の正確な実験により求められている。それは、氷点つまり 32 度で 100 立方フィート (または立方インチ) の空間を占める任意の弾性のある量の乾燥空気は、その弾性が元の値と同じ値に留まったまま、その温度が沸点つまり 212 度まで上昇したとき、137.5 立方フィート (または立方インチ) の体積を占めるように膨張する、というものである。

(p.77) 同じ法則によると、温度が氷点 32 度のとき高さ 30 インチの水銀柱を支持する弾性を持つ任意体積の空気は、その体積つまり占有空間が同じ値のまま、その温度が沸騰つまり 212 度まで上昇したとき、その弾性は、高さ (1.375 ×30 インチ =)41.25 インチの水銀柱を支持できる強さまで増加するであろう。

ある質量の空気が一定の弾性の下で膨張するとき、その体積の増加量は、等間隔に分割された水銀温度計による温度の増加量にほぼ比例する。華氏目盛の温度 1 度の増加ごとに生み出される空気の膨張量は、氷点温度のときに空気が持っていた体積のほぼ $\frac{1}{480}$ となる。

上記の比率は、水の氷点から沸点までの全温度範囲にわたって、極めて正確である。しかし、デュロンとプティ (Dulong and Petit) の両氏は、高温での空気の膨張の一連の実験を行い、より高温度でのその増分は、低温度での増分ほど大きくはないことを示している。しかし、その差は非常に小さく、トレッドゴールド (Tredgold) 氏は、これらの実験結果に十分近い値となる実用的な規則を作成した。

任意の温度での所定質量の空気の体積を求めること。華氏で表されたある温度で空気の体積が与えられていて、その空気が別の温度まで加熱されたときの体積を求めよ。ただし、その弾性は同じ値のままであるとする。

規則：二つのそれぞれの温度 (華氏) に定数 459 を加える。与えられた体積に、体積を求めるべき温度 (華氏) と 459 との和を掛け、その積を、体積を与えた温度と 459 との和で割る。その商が求める未知の体積である。

例：212 度の空気の体積が 136.66 立方フィートであるとき、その空気が 572 度まで加熱されたならば、その体積はいくらになるか？

このとき 212 度 + 459 = 671。572 度 + 459 = 1031。既知の体積 136.66 ×1031 = 140896 、÷671 = 209.98 立方フィートとなり、これが 572 度で空気が占める体積である。

計算式 (訳注)：華氏の絶対 0 度は -459.67 °F である。ゲイ=リュサックの法則 (シャルルの法則) より

$$
\begin{aligned}
(\text{未知の体積}) &= (\text{既知の体積}) \times \frac{\text{未知の絶対温度}}{\text{既知の絶対温度}} \\
&= (\text{既知の体積}) \times \frac{\text{未知の華氏温度 [°F]} + 459.67}{\text{既知の華氏温度 [°F]} + 459.67} = (\text{既知の体積}) \times \frac{\text{未知の摂氏温度 [℃]} + 273.15}{\text{既知の摂氏温度 [℃]} + 273.15}
\end{aligned}
$$

所定質量の空気の任意温度で弾性を求めるためにも、同じ規則を用いることができる。ある温度で空気の弾性が与えられているとして、その空気を別の温度まで加熱したとき、その弾性がいくらに増加するかを求める。ただし、空気の体積は両方の場合で同じに留まるとする。

上記の規則の体積を、弾性に置き換えるだけでよい。

例：温度 62 度の空気が高さ 30 インチの水銀柱を支持する弾性を有するとする。その空気の体積が変わらないまま、242 度まで加熱されたとすると、それはいくらの弾性を持つことになるか？

このとき、62 度 + 459 = 521、および、242 + 459 = 701。既知の弾性 30 インチ ×701 = 21030、÷512 = 41.09 インチとなり、これが求める弾性の水銀柱高さである。

表 8　熱による乾燥空気の膨張法則

温度 (°F)	乾燥空気の体積比 (—)		
	実験値	計算値 (定数: 459)	計算値 (定数: 450)
- 33	0.865	0.868	0.865
32	1.000	1.000	1.000
212	1.375	1.366	1.373
302	1.558	1.550	1.562
392	1.739	1.733	1.747
432	1.919	1.916	1.934
572	2.098	2.010	2.120
680	2.312	2.320	2.344

別表 (表 8) には、その最初の 2 列にデュロンとプティ両氏の実験結果が記載されている。第 3 列は、上記の規則による計算結果である。

第 4 列は、同じ規則の定数 459 の代わりに、450 を用いた結果である。これらは、氷点と沸点温度間での観測結果には極めて良く対応しているが、より高い温度では、その一致はさほど良くはない。

6.9　種々の温度と弾性における蒸気の密度

(p.78) 種々の温度と弾性における蒸気の密度は、直接の実験により十分に確立されているわけではないが、サザン氏は彼の実験結果から、水で飽和した蒸気の密度は全ての温度でその弾性に正確に比例すると結論した。

例えば、大気と同じ弾性の蒸気 (弾性 30 インチ水銀柱で温度 212 度) であれば、同じ体積の冷水より 1700 倍軽く (訳注：密度 1/1700 の意味)、そして、2 気圧の蒸気 (弾性 60 インチ水銀柱で温度 250.2 度) は 850 倍軽く、4 気圧の蒸気は 425 倍軽くなる。$\frac{1}{2}$ 気圧の蒸気 (弾性 15 インチ水銀で温度 178.6 度) は等しい体積の冷水より 3400 倍軽くなるであろう、等々。

この単純な法則が補正されるとすれば、蒸気の弾性は、単にその密度増加によるものの他に、温度の上昇によっても増大しなければならない (訳注：蒸気の密度は、単にその弾性 = 圧力の増加による増大の他に、温度の上昇による減少の影響も受ける) という事情により、変更されることが最も可能性の高い補正であろう。この蒸気の温度による弾性の増大は、一定密度のもとで空気または他の弾性流体の弾性が温度上昇により増大するのと同じ比率で生じると仮定する。この仮定に従えば、以前に空気に対して与えた規則から以下の規則が得られる。

任意の弾性の蒸気の体積と、それと同じ重さの冷水の体積との比を求めること。ただし、蒸気は水で飽和されていて、その温度は、実験、または前記の規則と表により知ることができるものとする。

規則：華氏の水銀温度計による蒸気の温度に定数 459 を加算し、その和に定数倍率 76 を掛け、その積を蒸気の弾性 (インチ水銀) で割る。その商は、求める蒸気の体積と等しい重さの冷水の体積との比となるであろう。

注意：弾性がポンド/平方インチの単位で表されているのであれば、一定の乗数 76 の代わりに 37.24 を使用する。

例：3 気圧または水銀柱 90 インチの弾性を持つ蒸気の体積はいくらになるか。ただし、その温度は 275 度であるとする。このとき、 275 度 + 定数 459 = 734 度、×定数倍率 76 = 55784、その積 ÷90 = 619.6 となり、これが (冷水の体積の基準とした) 求める蒸気の体積である。

計算式 (訳注)：ボイル=ゲイリュサックの法則より、

$$
\begin{aligned}
(\text{標準大気圧}) \times (\text{標準大気圧での蒸気体積}) &\propto (\text{沸点の絶対温度}) \\
(\text{任意圧力}) \times (\text{任意圧力での蒸気体積}) &\propto (\text{任意の飽和状態の絶対温度})
\end{aligned}
$$

これより、同じ重さの冷水の体積を基準として

$$
\begin{aligned}
(\text{任意圧力での蒸気体積}) &= (\text{標準大気圧での蒸気体積}) \times \frac{(\text{標準大気圧})}{(\text{任意圧力})} \times \frac{(\text{任意の飽和状態の絶対温度})}{(\text{沸点の絶対温度})} \\
&= 1700 \times \frac{(\text{任意状態の温度 [°F]} + 459) \times 30\ \text{inHg}}{(212 + 459) \times (\text{任意圧力 [inHg]})} = 76.01 \times \frac{\text{任意状態の温度 [°F]} + 459}{\text{任意圧力 [inHg]}}
\end{aligned}
$$

または、弾性をポンド/平方インチで与えると

$$
(\text{任意圧力での蒸気体積}) = 1700 \times \frac{(\text{任意状態の温度 [°F]} + 459) \times 14.7\ \text{lb/in}^2}{(212 + 459) \times (\text{任意圧力 [lb/in}^2\text{]})} = 37.24 \times \frac{\text{任意状態の温度 [°F]} + 459}{\text{任意圧力 [lb/in}^2\text{]}}
$$

または、SI 単位では

$$
\begin{aligned}
(\text{任意圧力での蒸気体積}) &= 1700 \times \frac{(\text{任意状態の温度 [℃]} + 273.15) \times 760\ \text{mmHg}}{(100\ \text{℃} + 273.15) \times (\text{任意圧力 [mmHg]})} = 3462 \times \frac{\text{任意状態の温度 [℃]} + 273.15}{\text{任意圧力 [mmHg]}} \\
&= 1700 \times \frac{(\text{任意状態の温度 [℃]} + 273.15) \times 0.101325\ \text{MPa}}{(100\ \text{℃} + 273.15) \times (\text{任意圧力 [MPa]})} = 0.4616 \times \frac{\text{任意状態の温度 [℃]} + 273.15}{\text{任意圧力 [MPa]}}
\end{aligned}
$$

注意：この規則は、蒸気が大気と同じ弾性を持って高さ 30 インチの水銀柱を支持するとき、つまり、温度 212 度で 14.7 ポンド/平方インチの圧力を及ぼしているとき、蒸気の体積は等しい重さの冷水の体積の 1700 倍であると仮定している。

上記の規則で使用される定数の数値は、以下のように得られる。定数 459 は、空気の膨張の規則で (絶対温度に直すために) 加算に使用されている定数である。上記の計算は、大気圧に等しい蒸気の標準温度 212 度に同じ値 459 を追加した 671 を除数として、標準の体積比率 1700 を被除数として除算し、また、標準の弾性値 30 インチ水銀柱を定数乗数として乗算する必要がある。上記の規則のなかで、これらすべての数字を 1 個の定数乗数にまとめると、(1700 ×30 ÷671 =) 76 となり、これを用いて計算は非常に簡単にされている。

注意：空気の膨張を計算するのに、定数 459 の代わりに 450 を用いるならば (p.77 を参照)、そのとき、上の規則の定数乗数は 76 に代えて、(1700 ×30 ÷(212 + 450) =) 77 となるであろう。

(p.79) 種々の弾性と温度での所定重さの蒸気の体積を、この規則により求めた結果を表 9 に示す。この表に示すように、所定重さの蒸気の体積は、その弾性に反比例する以上に弾性 (および温度) と共に大きくなる。

最後の列の数値が、単位体積の水を異なる弾性と温度の蒸気へ変換したときに発生する蒸気の体積、つまり占有空間を表す。

蒸気を発生するために必要とされる熱量は、すべての場合でほぼ同じ値になるであろう。なぜなら、蒸気に変換される水の量が常に同じであるからである[*48]。そして、より高温でより大きい弾性の蒸気が生成されるとき、その蒸気の占める空間はより小さいくなるであろう。等々。

[*48] これは、すべての実用的な決定のためには、おそらく十分な真理であろうが、厳密には正しくないことを p.70 で指摘している。蒸気の熱容量は、それがより高密度になるにつれて減少するので、所定量の重さの蒸気の温度を所定値だけ増大させるためには、その密度、弾性、温度がより大きくなるとき、それらが小さいときよりもより少量の熱量で済むであろう。これまで行われた以上により正確な実験により、これらの事実を確認することが、強く望まれるであろう。

表 9　種々の温度での蒸気の弾性と体積

温度	蒸気の弾性			蒸気の体積比
°F	atm	inHg	lb/in^2	—
82	$\frac{1}{30}$	1	0.49	41116
133.8	$\frac{1}{6}$	5	2.45	9010
161	$\frac{1}{3}$	10	4.9	4712
178.6	$\frac{1}{2}$	15	7.35	3230
192	$\frac{2}{3}$	20	9 8	2474
212	1	30	14.7	1700
233.7	$1\frac{1}{2}$	45	22.05	1170
250.2	2	60	29.4	898
263.8	$2\frac{1}{2}$	75	36.75	732
275	3	90	44.1	620
285	$3\frac{1}{2}$	105	51.45	538
293.9	4	120	58.8	471
301.9	$4\frac{1}{2}$	135	66.15	428
309.2	5	150	73.5	389
316	$5\frac{1}{2}$	165	80.85	357
322.3	6	180	88.2	330
328.1	$6\frac{1}{2}$	195	95.55	307
333.7	7	210	102.9	287
338.9	$7\frac{1}{2}$	225	110.25	270
343.8	8	240	117.6	254

これより、この表は、温度 62 度の水 1 立方フィートを加熱して生じる結果と、それを蒸気に変換する追加の熱量とをすべて表している。その追加の熱量は、(1172 - 62 =) 1110 立方フィートの水を 1 度だけ、温度上昇させるだけの量であると仮定されている。温度 上昇はたとえば 61 度から 62 度まで、または、555 立方フィートの水であれば、60 度から 62 度までの 2 度の温度上昇となる。

上記の表は、高圧の蒸気ボイラにおいて、温度が冷水の状態から上昇して、蒸気が蓄積されて 8 気圧の弾性を獲得するまでの経過に沿って、生成される蒸気の状態に生じる時間的な変化を表している。その表の最初の列は温度の増加を示し、第 2 列、第 3 列、および第 4 列は対応する弾性力を示し、第 5 列は、蒸気の希薄度、つまり、液体の水の単位体積の蒸発から生じるその条件での蒸気の体積を表している。

(p.80) これをより十分に説明するために、20 立方フィートの冷水が容量 30 立方フィートの強固な密閉ボイラに入れられている場合を仮定する。そのとき、加熱されたときに水から発生する蒸気を受け入れるために、水の上に 10 立方フィートの空間が残されている。その空間は、大気の圧力から解放するために、空気が完全に排気されているとし、また、水の温度は 82 度まで上昇しているとする。そのとき、その温度で放出された非常に少量の蒸気が、その 10 立方フィートの空間を埋めて、その温度は水の温度と同じ 82 度となるであろう。しかし、蒸気は、非常に希薄であり、ボイラの内表面 1 平方インチあたりわずか 0.49 ポンドの力、または高さ 1 インチの水銀柱で作り出される圧力に等しい力を及ぼすだけとなる。そして、大気がボイラの外表面を 1 平方インチあたり 14.7 ポンドの力で常に押しているので、ボイラを破壊して

内側へ押し込もうとする空気の不つり合い圧力は、1 平方インチあたり 14.21 ポンド、つまり、大気の全圧力の $\frac{29}{30}$ となるであろう。

上の表 9 に従うと、この希薄な蒸気は同じ体積の水の $\frac{1}{41116}$ の重さしかない。または、サザン氏の主張に従えば、$1/(1700 \times 30) = \frac{1}{51000}$ しかないであろう。1 立方フィートの水 (62.5 ポンド) の重さは 437500 グレーンであるので、そのような希薄な蒸気 1 立方フィートの重さは、わずか $(437500 \div 41116 =)$ 10.63 グレーンとなる。その結果、10 立方フィートの空間を満たす蒸気の重さは、わずか 106.35 グレーンとなるであろう。

82 度の同じ重さの水に自然に含まれる熱量を基点とすると、その蒸気中に含まれる熱量は、その重さの $(1172 - 82 =)$ 1090 倍の重さの水を温度 1 度だけ上げるのに十分な熱量となるであろう。それは 1090×106.3 グレーン $=$ 107300 グレーンの水を、81 度から 82 度へ上げる熱量となる。107300 グレーンは $(\div 7000 =)$ 15.47 ポンドに等しく、$(109000 \div 41116 =)$ 0.245 立方フィートの水に等しい。

ボイラに供給される火の熱は、その中の水に伝えられて、次々に水を蒸気へ変えていく。蒸気はそこから引き出されることなく、ボイラ内に保持されていると仮定すると、その蒸気は 10 立方フィートの空間に蓄積されなければならず、表の異なる行で示されているように、次第により高密度、より高弾性、より高温になっていく。

たとえば、非常に多くの蒸気が蓄積されて、大気圧つまり 14.7 ポンド/平方インチに等しい圧力になると、その温度は 212 度となり、その蒸気は、同じ体積内に水の $\frac{1}{1700}$ の重さの蒸気を含んでいる。したがって、10 立方フィートの蒸気の重さは $(10 \times 62.5 \div 1700 =)$ 3676 ポンドとなる。82 度の等しい重さの水の熱量を起点としたその蒸気の熱量は、その重さの $(1172 - 82 =)$ 1090 倍の水を 1 度温度上昇させる値となるであろう。その結果、そのような蒸気 10 立方フィートの熱は、$(1090 \times 0.6375 =)$ 643 ポンドの水を 81 度から 82 度へ温める値となる。

最後の例として、蒸気がボイラ内で徐々に蓄積されて、その弾性が大気の弾性の 8 倍の大きさになり、ボイラの内表面の 1 平方インチあたり 117.6 ポンドを及ぼすようになると仮定する。大気圧の空気がその外側を 14.7 ポンド/平方インチで押すので、蒸気がボイラを外へ破裂させて空気中へ逃げるように作用する力は、102.9 ポンド/平方インチとなるであろう。このように保持される蒸気の温度は 343.8 度となり、その密度は、上記の表によれば、等量の液体の水の密度の $\frac{1}{254}$ の値となる。または、サザン氏に従えば、$1/(1700 \div 8) = \frac{1}{212.5}$ となる。これより、蒸気 10 立方フィートの重さは、(625 ポンド $\div 254 =)$ 2.46 ポンドとなるであろう。

82 度の等しい重さの水に含まれる熱量を起点として、この高温の蒸気に含まれる熱量は、その重さの水の $(1172 - 82 =)$ 1090 倍の重さの水を 1 度上昇させる値よりも、はるかに大きな値となるであろう。その結果、そのような蒸気 10 立方フィートに含まれる熱により、81 度の水 (2.46 ポンド $\times 1090 =)$ 2830 ポンドを 82 度へ暖めることができるであろう。または、1415 ポンドの水であれば、 80 度から 82 度へ温度を上げられるであろう。

これらすべての場合で、蒸気が発生している水は、それと接触している蒸気と同じ温度となるであろう。そして水は蒸気の弾性力により圧縮されているので、弾性に必要な潜熱を供給された量の水 (訳注：蒸発した水) を除いて、膨張して気体状態となるのを防止されている。その供給熱量には、水を蒸気と同じ温度にするために必要な顕熱は含まれない。

上の記述は、著者が得ることができた最善の情報に従って、蒸気のすべての最も本質的な特性をその定義にかなうように正確に説明している。しかし、真実を正確に把握するのに十分な実験が存在していないために、実務に携わる人々に対し、この導入部の他の記述と同程度の自信を持って、上述の計算を推奨することはできない。