

蒸気動力技術史のための基礎知識 --- steam engine の意味と役割

1.Engine の理論的定義

物理学的には、Engine は「ある物体の持つエネルギーを他の物体に伝達する装置」、「エネルギーの形態変換をおこなう装置」として理解することができる。たとえば、横型動力水車(horizontal wheel)という動力機は、「流水の運動エネルギー」を「動力水車の回転軸の回転運動エネルギー」という形態に転換する装置である。また自動車のガソリン・エンジンという動力装置は、エンジン内部におけるガソリンの爆発的燃焼によって生じる熱エネルギーを、ガソリン・エンジンのピストン軸の運動エネルギーに転換する装置である。

これに対して技術史や技術論の対象としての Engine は、そうした「エネルギーの形態変換」機能に加えて、「何らかの生産的作業のために利用可能なような特性の付与」機能を持つ装置として定義される。すなわち物理学的な意味での Engine の内で、生産における有用性を持つものだけが、技術史や技術論における Engine である。

すなわち技術史や技術論では、「一定の目的で利用可能なように、制御されたエネルギーを生産する装置」として Engine を定義するのが有用である。なおそうした Engine 定義における「一定の目的で利用可能なように、制御されたエネルギー」を「動力」として定義することで、エネルギー一般と区別して動力という用語を用いることとする。

2.燃焼プロセスの場所の差異による熱機関(heat engine)の区別 --- 外燃機関 vs 内燃機関

熱機関は、燃焼プロセスをエンジン内部で行わせるのか、外部で行わせるのかという技術的方式の差異により下記の2種類に大別できる。

A.内燃機関(内部燃焼機関 internal combustion engine)

燃焼プロセスをエンジン内部で行わせることにより、燃焼部をエンジン部とは別に持つ必要がないため、動力機の軽量化を図ることができるので、自動車や飛行機など輸送機械のエンジンに適している。自動車のガソリン・エンジンやディーゼル・エンジンなどが内燃機関である。

B.外燃機関(外部燃焼機関 external combustion engine)

燃焼プロセスをエンジン外部で行わせるためには燃焼部をエンジン部とは別に持つ必要がある。そのため、同一出力であれば内燃機関よりも外燃機関の方がどうしても重くなるので、単位重量当たり出力(Power Weight Ratio)が問題となる輸送機械のエンジンには適していない。

しかしながら燃焼部とエンジン部を分離することで、ワットの分離凝縮器(Separate Condenser)がそうであるように高温の燃焼部とはまったく独立に低温熱源の場所を確保することができるので、低温熱源の温度TLをより低くすることができるため、より高い熱効率の実現が可能になる。

なお歴史的には、steam engine という外燃機関の技術の方が内燃機関に先行して発達したため、20世紀初頭でもなお蒸気自動車は実用的なものであり、ガソリン自動車と競合する商品として販売されていた。また鉄道や船など、動力装置の総重量が相対的には問題とならない輸送機械では長く外燃機関が用いられることになる。

3.熱効率の定義

熱効率は、エンジンに投入された熱エネルギーがどの程度まで仕事して外部に取り出すことができたかを示す値である。すなわち熱効率は、外部に取り出すことができた仕事量 W を投入した熱エネルギー量 Q で割った値を%表示したものである。蒸気機関(steam engine)の熱効率は、水蒸気を理想気体と見なして蒸気機関の動作プロセスを分析することで推定することができる。

熱から力学的仕事を取り出す熱機関(heat engine)としての蒸気機関に投入される熱エネルギーは、蒸気機関に最初に投入される高温水蒸気を持つ熱エネルギーのことである。そして外部に仕事を取り出すプロセスが終了した後に残る低温水蒸気を持つエネルギーは最終的にはムダに捨て去られることになる。すなわち steam engine の動作原理は、熱機関としては下記のようなプロセスから構成されている。

- (1) Steam Engine への高温水蒸気の注入(seam engine へ熱エネルギーを注入するプロセス、すなわち、高温熱源から steam engine が熱エネルギーを吸収するプロセス)
- (2) 高温水蒸気を利用した力学的エネルギーの取り出し(seam engine を利用して熱エネルギーを力学的仕事に変換するプロセス)
- (3) 力学的エネルギーを取り出した後に残る低温水蒸気の廃棄(外部への仕事の取り出しに使うことができない熱エネルギーを系の外部に捨て去るプロセス)

(2)のプロセスにおいてニューコメン機関やワット機関が1行程でなす仕事量 W [J]は、ピストンに働く力を F [N]、ピストンに働く圧力を P [N/m²]、ピストンの断面積を S [m²]とすると、 F [N]= P [N/m²] $\times S$ [m²]であるから、ピストンの長さ(有効行程)を L [m]とすると、 W [J]= $\int_0^L F dx = \int_0^L PS dx$ となる。

したがって、ピストンに働く圧力 P が一定であれば、仕事量 W [J]= PSL となる。蒸気機関がなす仕事量 W は、圧力 P が大きくなればなるほど大きくなるだけでなく、シリンダーの断面積 S やピストンの長さ L が大きくなればなるほど大きくなる。すなわち蒸気機関のエンジン部の容積 $V=SL$ が大きくなればなるほど大きくなる。

それゆえ蒸気機関の出力を上げるには、利用する水蒸気圧を上げるか、シリンダーの断面積 S やピストンの長さ L を大きくして蒸気エンジン部を大きくする必要がある。

(3)のプロセスは、ニューコメン機関(Newcomen Engine)やワット機関(Watt Engine)はシリンダー内部の空気を排気するために水蒸気を利用しているが、排気のために利用された水蒸気を持つ熱エネルギーは仕事の取り出しには使われずムダに捨て去られることを意味している。すなわち、仕事を取り出すために使用された作業流体としての水蒸気を何らかの方法で低温熱源に接触させ冷却して水に戻す過程(復水過程)で、外部に仕事を取り出した後に残った水蒸気の熱エネルギー $Q_L = nC_v T_L$ [水蒸気のモル数:n、水蒸気の定積モル比熱: C_v 、水に戻される直前の水蒸気の温度: T_L]はムダに捨て去られる。

ニューコメン機関ではシリンダー内部に冷水を噴出させることで水蒸気は冷却されて水に戻され、ワット機関では分離凝縮器(separate condenser)で水蒸気が冷却されて水に戻されるが、そうした復水過程で失われる水蒸気の熱エネルギーは外部への仕事の取り出しには利用されず、ムダに捨て去られることになる。

エンジンに投入された熱エネルギー量は、「高温熱源から取り入れた熱エネルギー量」 Q_H に等しい。「高温熱源から取り入れた熱エネルギー量」 Q_H を用いて外部に仕事をするのであるから、「外部に取り出すことができた仕事量」 W_{out} と「最後に低温熱源に捨て去る熱エネルギー量」 Q_L の合計値は Q_H と等しいか、それ以下となる。それゆえエネルギー効率 e は、下記のようになる。

$$\text{熱効率 } e = \frac{W_{out}}{Q_{in}} \leq \frac{Q_H - Q_L}{Q_H} = 1 - \frac{Q_L}{Q_H}$$

蒸気動力機関では、 Q_H はエンジンに最初に投入された高温水蒸気という形態の水分子がもつ熱エネルギー量であり、 Q_L はエンジンに残った低温水蒸気という形態の水分子がもつ熱エネルギー量であることからすぐにわかるように、 $Q_H \propto T_H$ 、 $Q_L \propto T_L$ である。

それゆえ

$$\text{熱効率 } e = \frac{W_{out}}{Q_{in}} \leq 1 - \frac{T_L}{T_H}$$

となる。それゆえ熱効率 e は、高温熱源の温度 T_H が高ければ高いほど、また低温熱源の温度 T_L が低ければ低いほど高くできることになる。

こうした視点から見ると、低温熱源の利用をエンジン外部で行うワットの分離凝縮器(separate condenser)の特許は、より低温の熱源を利用して T_L を下げることで熱効率 e を上げようとする技術的試みとして理解することができる。

また右の表に示されているように、19世紀以降における高圧水蒸気の利用は、理想気体に関する状態方程式 $PV=nRT$ から導出される $T=PV/nR$ の式からわかるように、より高温の熱源を利用して T_H を大きくすることで熱効率 e を上げようとする技術的試みとして理解することができる。

	圧力 (atm)	温度 (°C)	出力 (馬力)	タイプ
蒸気機関車	16	350	1280 馬力	レシプロ型
戦艦大和	25	325	15 万馬力	タービン型
石炭火力発電所	247	600	136 万馬力	
原子力発電所	67	284	184 万馬力	
LNG 船	61	515	3.7 万馬力	

[出典]ターボ機械協会(2007)「蒸気タービン」(http://www.turbo-so.jp/turbo_o_descript/turbo_for_kids05.htm)の表1を基に、単位や表記を変更した。

表に示されているように、原子力発電所の蒸気タービンで用いられている水蒸気の温度や圧力は、熱源として利用する核燃料棒の被膜の耐熱性の問題のため、火力発電所と比べ、温度は約 1/2、水蒸気圧は約 1/5 とかなり低い。そのため原子力発電所の熱効率は約 30%と、一般的な火力発電所の熱効率約 47%よりも低い。

4.蒸気動力機関の技術的特性

(1) 作業媒体としての水蒸気、水の優位性

水は比較的低価格で容易に入手可能な物質であるだけでなく、通常の大気圧(1気圧)の下では摂氏 100 度で水蒸気になるが、その際に体積が約 1,700 倍にもなるという優れた性質を持っている。

(2) 動力水車と直動式蒸気動力機関の技術論的比較のための基準

動力水車の平均出力は、18世紀前半は4~7馬力程度であったが、蒸気動力機関の社会的普及が進み始めた18世紀後半から19世紀前半の間に12~18馬力程度まで上昇した^[1]。

a.比較基準1 --- エネルギー密度の大きさ

動力発生に利用するエネルギー源のエネルギー密度(単位重量当たりのエネルギー量)は、石炭をエネルギー源とする蒸気動力機関の方が水の位置エネルギーや運動エネルギーを利用する動力水車に比べて極めて大きい。

1)水の運動エネルギーをエネルギー源とする下射式動力水車の場合

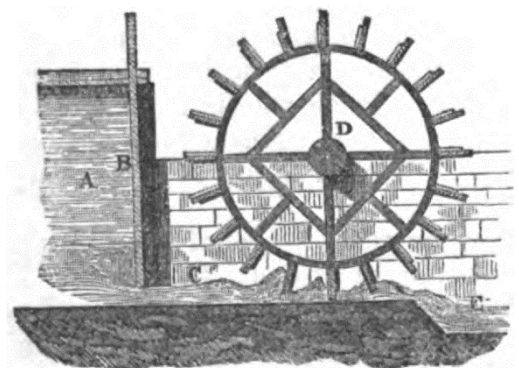
質量 M で速さ V の物体の運動エネルギー E は $E = 1/2MV^2$ であるから、この場合のエネルギー密度 ρ_l は下記のようになる。

$$\rho_l [\text{J/kg}] = \frac{E [\text{J}]}{M [\text{kg}]} = \frac{1/2MV^2}{M} = \frac{1}{2}V^2$$

したがって利用している流水の速さ V が 10m/s の場合には、 $\rho_l = 1/2 \times 10^2 = 50 [\text{J/kg}]$ となる。

ただし下車式水車の場合、水車の回転軸等における摩擦を無視したとしても、流水の運動エネルギーすべてを利用できるわけではない。というのも下車式水車では、回転している水車の羽根への流水の「非弾性衝突」によって流水の運動エネルギーが水車の回転運動エネルギーに転換されているからである。水車の羽根の回転速度があることや、非弾性衝突であるために、流水の運動エネルギーの中で実際に有効に利用できるのはかなり少ない。

近代的な下射式水車の例



[出典]W. J. M. Rankine(1861) A manual of the steam engine and other prime movers, Griffin, Bohn, and Company, p.162

[1] T.S.レイノルズ(末尾至行ほか訳,1989)『水車の歴史 --- 西欧の工業化と水力利用』平凡社,p.342,Reynolds, Terry S. (2003) *Stronger Than a Hundred Men: A History of the Vertical Water Wheel* (Johns Hopkins Studies in the History of Technology), Johns Hopkins Univ Pr; New edition,p.306

水車の羽根部分の回転速度と、水車にかかる流水速度の差が大きければ大きいほど水車にかかる力がより大きくなるが、そうであればあるほど「非弾性衝突」によって失われるエネルギー量が大きくなる。

18世紀後半の下射式水車のエネルギー効率は20~30%であった^[2]。

2)水の位置エネルギーをエネルギー源とする上射式動力水車の場合

$$\rho_2 \text{ [J/kg]} = \frac{E \text{ [J]}}{M \text{ [kg]}} = \frac{Mgh \text{ [J]}}{M \text{ [kg]}} = gh \text{ [J/kg]} = 9.8h \text{ [J/kg]}$$

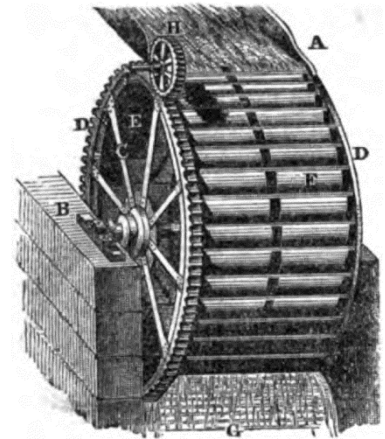
利用している水の有効高低差 $h=20\text{m}$ の場合で

$$\rho_2 = 9.8 \times 20 = 196 \text{ [J/kg]}$$

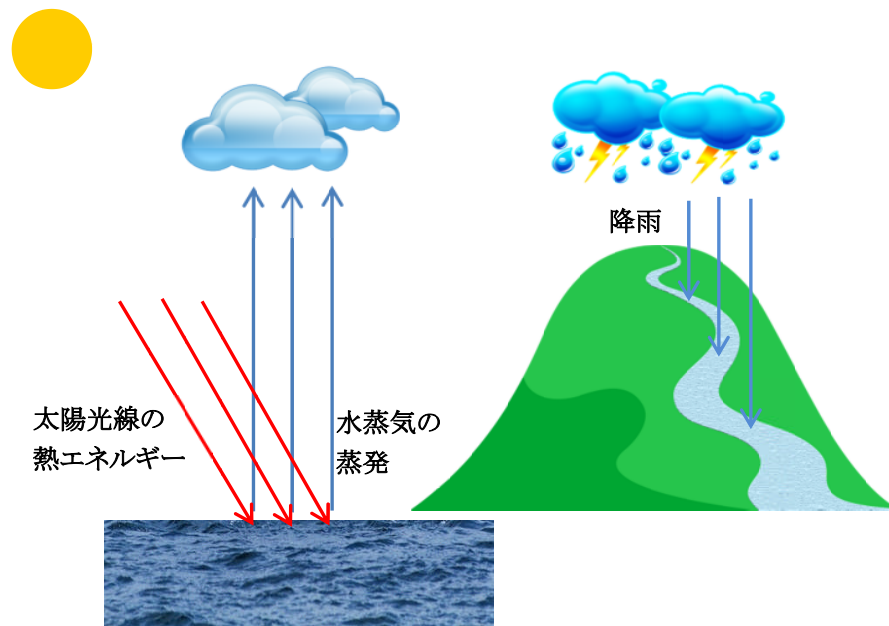
となる。

なお 18 世紀後半の上射式水車のエネルギー効率は 55~65%であった^[3]。

近代的な上射式水車の例



[出典]W. J. M. Rankine(1861) *A manual of the steam engine and other prime movers*, Griffin, Bohn, and Company, p.162



<再生可能エネルギーとしての水力エネルギー>

動力水車の動力源となる流水の運動エネルギーや貯水池に貯められた水の位置エネルギーの究極的源泉は、太陽の熱エネルギーである。

それゆえ水力エネルギーは、化石燃料として埋蔵量が限られており再生不可能な石炭とは異なり、再生可能なエネルギーである。

3)石炭をエネルギー源とする蒸気動力機関の場合

$$\rho_3 = 7500 \text{ kcal/kg} = 7500 \times 10^3 \text{ [cal/kg]} \times 4.2 \text{ [J/cal]} \doteq 3.2 \times 10^7 \text{ [J/kg]}$$

石炭のエネルギー密度は種類によって異なるが、上記の値とさほど大きくは変わらない。10m/s というかなり速い流速の流水で 50[J/kg]、有効高低差 20m と極めて大きな上射式動力水車で 196[J/kg] というエネルギー密度であるから、石炭は水をエネルギー源とする場合よりも、少なくとも $10^5 = 10$ 万倍以上という極めて大きなエネルギー密度である。

b. 比較基準2 ---場所的自由度の大きさ(場所的限定性の小ささ) --- 水の移動コスト vs 石炭の移動コスト

エネルギー密度の違いを考えると、水を石炭と同じように輸送機関で輸送することは現実的ではない。それゆえ動力水車の利用は、水を豊富に手に入れることができる場所の近く、すなわち、川や用水路などの近くか、ダムや貯水池の近くに限定された。しかもその場合でも水路や導水管を設置して動力水車の設置箇所まで水を導く必要があった。

工場に動力水車や蒸気動力機関を設置して一次的な動力機として利用する場合には、動力機の場所的自由度が限定されるという問題は工場設置者にとって重要な問題であった。

[2] T.S.レイノルズ、前掲書、p.310、Reynolds (2003), *op. cit.*, p.281

[3] T.S.レイノルズ、同上書、p.339、Reynolds (2003), *ibid.*, p.306

蒸気タービンやタービン水車など一次的な動力機を発電機とし、工場で電動モーターを利用する現代的な技術システムでは、一次的動力機の場所的自由度の問題は発電所側の問題となっている。発電所に関する場所的制約は大きい、電線による送電によって工場の立地に関する場所的制約はかなり小さくなっている。

「エネルギー源」兼「作業流体」としての水の移動や、「エネルギー源」としての石炭の移動という場所的自由度の拡大に関する従来の技術的対応は、電気の時代になり「送電線による電流(電気エネルギー)の移動」という新しい技術的対応法に取って代わられたのである。

c. 比較基準3 ---時間的自由度の大きさ --- 貯水量・流量の限定性 vs 石炭の貯蔵量の限定性

蒸気動力機関は動力水車よりも、「時間的限定性がより少ない」、「調節がより簡単である」などの特性を持っている。

水門やダムなどを利用して水を蓄積することで動力水車の場合であっても、渇水期の到来などによる川の水の季節的变化に一定程度は対応可能であるし、水の供給量を流水ゲートの開閉度によって調節するなどの方法で動力水車の出力を一定程度は調整することができる。

しかしそうした付帯設備がない伝統的な下射式水車の場合には、渇水期には利用できなくなるなどその駆動に季節的制約があった。18世紀後半から19世紀前半にセーヴァリ型蒸気機関と上射式動力水車を組み合わせたハイブリッド型システムが利用されることになった^[4]。

[考察してみよう]

こうしたハイブリッド型システムが利用された技術的理由が何であったのか考えてみよう。

外部電源による充電ができないが、電動モーターとガソリン・エンジンという二つの駆動システムを持っている非プラグイン型ハイブリッド自動車と共通性があるかないかを考えてみよう。

パパンの蒸気機関と縦型動力水車とのハイブリッド型製品 (1707)

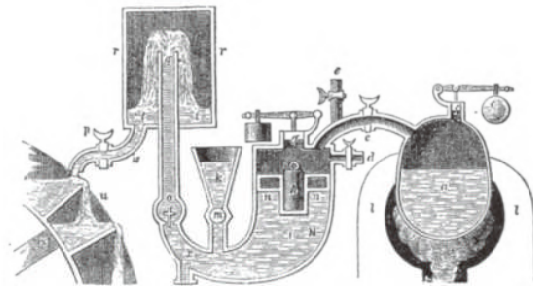


FIG. 18.—Papin's Engine and Water-Wheel, A. D. 1707.

[出典]Robert Henry Thurston(1878) *A History of the Growth of the Steam-Engine*, p.53 の図 18

c. 比較基準4 – 単位出力の大きさ

歴史上最大単位出力の動力水車は、バーデン(Henry Burden, 1791/4/22– 1871/1/19:イギリスのスコットランド出身の技術者)が1852年にアメリカのニューヨーク州 Troy で建造したものであると言われている。

上射式のその動力水車は、直径 60ft(約 18m)、幅 22ft(約 6.7m)の大きさで、回転軸と側板は铸铁製、スポークは錬鉄棒であったが、水を受けるバケットや底板は松の木材(ただし鉄で補強はされていた)であった。水車の定格出力は 278 馬力で、エネルギーの効率は 84.25%であった^[5]。

なお 19 世紀中に用いられていた動力水車の出力に関する様々な報告書における平均出力は、次頁の表のように 10 数馬力～30 馬力である。

バーデンの水車(1851)

[出典]“Henry Burden” Wikipedia 英語版 http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/0/02/Burden_Wheel.png



[出典]”Henry Burden 1791-1871 : Troy's most famous inventor” Troy Networking for Innovation <http://web.archive.org/web/20050406125831/http://connectedkids.sbrl.rpi.edu/troyArtHistory/TroyInnovations/innovators/burden/index.html>



[4] T.S.レイノルズ,前掲書,pp.350-362の「蒸気機関と水車」[Reynolds,T. S. (2003), op. cit., 321 ページ以降の“The Steam Engine and the Vertical Water Wheel,c1700-c1850”の節]が参考になる。

[5] T.S.レイノルズ,前掲書,pp.347-3348 [Reynolds,T. S. (2003), op. cit., pp.318-319]。なお最大出力は 500 馬力と推定されている。

年	19 世紀における動力水車の利用実態に関する調査の結果	平均馬力
1835	イギリスの織物工場において利用されていた動力水車に関する工場査察官による報告: 1,037 台の動力水車で総出力が 12,138 馬力	12
1836	West Riding 地域で 102 台の動力水車で総出力が 873 馬力	9
1837	Bolton 地区で 60 台の動力水車で総出力が 1,171 馬力	20
1838-39	イギリスの 39 の織物工場において利用されていた動力水車に関する工場査察官による報告: 2,230 台の動力水車で総出力が 27,983 馬力	13
1842	イギリスの南西部の鉱山で排水用に用いられていた 8 台の上射式水車	29
1853	Wandle 川沿いの 32 の工場(工場の約半数が製粉工場、その他がタバコ、製油、製紙、フェルト、印刷などの産業用工場)における 52 台の動力水車で総出力が 781 馬力	15
1868	ドイツのプロイセン地方における 193 台の動力水車および 3 台の水圧機関で総出力 2,896 馬力	15
1870	1870 年のアメリカの国勢調査によれば、51,018 台の動力水車で総出力が 1,130,431 馬力	22
1880	1880 年のアメリカの国勢調査によれば、55,404 台の動力水車で総出力が 1,225,279 馬力	22
1899	Wilhelm Müller の 1899 年発行の著書 <i>Die Eisernen Wasserräder</i> , 1 における 57 台の鉄製上射式水車	13
1899	Wilhelm Müller の 1899 年発行の著書 <i>Die Eisernen Wasserräder</i> , 1 における 5 台の胸掛け水車	20

[引用元]Reynolds,Terry S. (2003) *Stronger Than a Hundred Men: A History of the Vertical Water Wheel* (Johns Hopkins Studies in the History of Technology),Johns Hopkins Univ Pr; New edition,p.311 を日本語訳した。

5.初期蒸気動力機関のランニングコスト

T.Young の T.Young(1807) *Lectures on Natural Philosophy* による試算

「ウマの日常の仕事は 5～6 人の仕事に等しく、ラバの力は 3～4 人のそれに等しい。ウマ 1 頭を飼う費用はだいたいの労働者の日当の 2～3 倍と同じである。だからウマの力の値段は人間の場合の半分という勘定になる。……ボルトン氏によれば、1 ブッシェル(約 38kg)の石炭は $8\frac{1}{3}$ 人が 1 日にする仕事とおなじか、あるいはそれより大きい。この石炭量の値段が労働者 1 人 1 日の賃金をこえることはめったにないが、機械の値段が高いので、蒸気機関が代替したウマの動力費の半分よりもやや高い程度の動力費になる」R.J.フォーブス「動力」[筑摩書房版『技術の歴史』第 7 巻、p.138 における T.Young,*Lectures on Natural Philosophy*,Vol.1,pp.132f.London,1807 の見解の紹介,単位のみ訳を変更]

上記で紹介した T.Young の見解によれば、下記のように蒸気機関のランニングコストは馬の約半分であった。

馬 1 頭の仕事 = 人間 5～6 人分の仕事

馬 1 頭を飼う食費 = 労働者の日当の 2～3 人分

∴ 馬 1 頭がなす仕事のコスト = 人間 1 人のなす仕事のコストの半分

1 ブッシェル(約 38kg)の石炭によって蒸気機関がする仕事 = 人間 $8\frac{1}{3}$ 人が 1 日にする仕事

1 ブッシェル(約 38kg)の石炭の値段 = 労働者 1 人の 1 日分の日当

∴ 蒸気機関の値段を考慮に入れても、蒸気機関がなす仕事のコスト = 馬がなす仕事のコストの半分

[出典]T.Young(1807),*Lectures on Natural Philosophy*,Vol.1.p.132 の箇所は、T.Young(1807),*A course of lectures on natural philosophy and the mechanical arts*,pp.102-103 で読むことができる。