

動力規模拡大の歴史 ー生産技術の歴史をスケーリングするー

Scaling the historical expansion of the motive power

坂田 直起/Naoaki SAKATA

[Abstract]

The magnitude of power $P(t)$ (for example horsepower) which appeared at a historical time point (Common Era) t is converted to a function of the time interval of (T_c-t) using the specified parametric year T (which is larger than any time t), then the relation between $P(t)$ and (T_c-t) can be scaled. We found that, as long as the time T is selected appropriately, the pattern of the historical development of the maximum power scale of heat engines $P_1(T_c-t)$, such as fossil fuel and nuclear power units which are the main stream and the largest power at present time, is similar with the pattern of the maximum power scale of the water wheels $P_2(T_c-t)$, which were the main natural power during the medieval and early modern age. They are also similar with the pattern of the animal power (oxen power) $P_3(T_c-t)$, which were the first utilized natural power outside the human muscle power from pre-history to ancient times. With this common parameter T_c , these developing patterns $\log P_i(T_c-t)$ ($i=1, 2, 3$) are the discrete fractals against $\log(T_c-t)$. Theoretically, the pattern of $P_i(T_c-t)$ is supposed to diverge to infinity at the point of $t=T_c$ (critical year). But in the real world, the upper limit of power scale exists because of the difficulties to control power and strength and/or durability of the constructing materials of power machinery. The development of power is observed rather to stop growing and become stagnant as the critical year approaches. In addition, the log-periodic oscillations are often observed correcting the usual power-laws. The discrepancy between the theory and the real world is explained using the theory of log-periodicity. Moreover, we forecast the future of new kind of power generating device (photovoltaic generation) under the newly determined parameter T_c using the many demonstrated experimental mega-solar data, and estimate the year when the solar power will surpass the maximum capacity of heat engines which are now in the stagnation period.

[キーワード]

動力規模、べき乗則、相似、スケーリング、畜力、水車、熱機関、太陽光発電、臨界年、発散、対数周期性

1. 緒言

von Foerster ら¹⁾はマルサスの人口増加の式 $dN/dt=aN$ に対して、技術や意思疎通の進歩が生活条件を改善すると、平均的な寿命が伸び、人口がより急速に増えるであろうとして、係数 a を N のべき関数に変えて $a=a_0N^{1/k}$ ($k<1$) とするコアリション (coalition = 連合) モデルを *Science* に発表した。それによれば世界人口 P は (T_c-t) のべき関数で表され、その式は双曲線関数に非常に近いので $t=T_c \approx 2027$ 年に特異点となり人口成長速度は無限大に発散すると予測した。これに対して Andrey V. Korotayev²⁾ は、von Foerster らの本当の含意は、数世紀間続いてきた世界人口の成長パターンが終わりを告げ、1960 年より根本的に異なるパターンに変化するであろうことを喚起したかったのだろう、と述べている。

Anders Johansen, Didier Sornette³⁾ は人口と世界の DGP および 2, 3 の経済指標との間には緊密な関係が得られることが期待できるとして $p(t)=a(T_c-t)^z$ で表されるべき乗則の指数 z (実数) を複素数 $\beta+i\omega$ に拡張して $p(t)=a(T_c-t)^{\beta+i}$ とし、その実部をグラフにて表すと、べき乗則の挙動は $\cos$ の項で表される対数周期振動 (log-periodic oscillation) で補正されるとした。その結果、世界人口 $\log p$ は $\beta \log(T_c-t)$ で表される直線に沿って周期変動を伴いながら増加を続け、臨界点 $t=T_c$ となっても発散することはない、ただ体制が変化するだけであるとしている。

我々は先史時代から現代まで、家畜による動力や各種動力機器による動力の規模の拡大が人間の肉体労働を軽減して寿命を延ばし、ひいては人口を増やすのに貢献してきたと考える。しかしながら先史から近世までの長い間、動力についての定量的な概念がなかったためか、動力規模の歴史的拡大についての定量的な報告は見当たらない。そこで我々は (特に先史・古代については) 動力機器が出現した時代に、どれ程の大きさの動力が使われたかに着目した。例えば鋤で地面を耕す人間の作業に代わって、初めて家畜動物が犁を曳いた年代について、印欧語の言語学者で考古学者でもあるMarija Gimbutas⁴⁾は雄牛による犁の牽引が5千年紀の後半に始まったと述べている。当時、雄牛が(oxenの言葉から)2頭使役されて犁を曳いたことが判り、現代の雄牛1頭(ox)の牽引力の測定値(0.66馬力)を用いて、当時の最大動力の大きさを $0.66 \times 2 = 1.32$ 馬力と推定することが可能となる。あるいは、初めて水車により小麦を碾いた時には同じ量の小麦を人力でロータリー・カーンで碾く場合、あるいはロバまたは奴隷によって碾く場合にどれほどの労力がかかったかなどから、当時の上掛け、下掛け水車の動力の大きさをElio Lo Cascio, Paolo Malanima⁵⁾が推定している。このようにして動力の概念のない先史・古代から、動力の概念が明確になった現代までの長い歴史時間に対し各種動力機器がどのように拡大してきたかを知ることができ、先史時代から現代までの長い期間にわたる動力規模拡大の歴史を一貫して定量的にモデル化することが可能となる。

2. 動力の留意点

「動力」とは与えられた時間内にどれだけの仕事量ができるかであり、

$$\text{動力} = \text{要した機械的エネルギー} / \text{時間}$$

$$= \text{力} \times \text{動いた距離} / \text{時間}$$

$$= \text{力} \times \text{速度}$$

と表される。よって「エネルギーが必要である」という場合に、実際には「より大きな動力」が必要であることを意味する場合が多く、これはさらに上の式から「より大きな力」、あるいは「より速く」動かしたいという要求があることを意味している。したがって、人間の歴史がエネルギー獲得の歴史であると言う場合、それはより大きな動力の獲得の歴史でもあり、それは仕事に対し、より大きな力とより大きい速度を求めてきた歴史であるとも言えよう。

このように動力が定義された場合、動力にたいしては速さや力あるいは方向が思い通りに精度よく定められること、すなわち制御が必要不可欠であることが判る。このことは逆に、地震や台風などが大きなエネルギーを持ちながら、なぜ我々が動力として利用できないのかを説明するものでもある。さらに、動力には上の式でわかるように動力機器には力が働くのでこの力に耐える材料がなければならない。すなわち動力の大きさに対応して、その力に耐える材料が必ず問題となる。このように動力の拡大には制御と材料とが制限条件となるので、これらの点に注意して動力の歴史を見てみることにする。

動力の単位としては仕事率、kw、馬力(horsepower) などがあるが、馬力の概念は1774年にジェームス・ワット(James Watt)が蒸気機関を発明したときに正確に定められた⁶⁾。ワットが蒸気機関を顧客に売り込むにあたって、彼は平均的な1頭の馬が挽き臼を回して製粉する量を測ってその仕事率を1馬力とし、それと蒸気機関によって一定時間になされる仕事量(製粉する量)と比較することで、その蒸気機関の能力が馬何頭に相当するかを定めた。現在ではこれをもとにして牛、ロバなどの家畜の1頭あたりの最大馬力も表-1の1秒あたりの圧力(原訳まま)の比率で表される。そこで牽引馬の動力を最大1馬力とした場合に、牛、ロバなどの最大馬力は馬に対する動力の比率から定められる。表-1に各家畜とヒトが発揮する最大馬力を示す。

その後動力は電気の発明により電線を經由して容易に輸送できるようになり、だれもが電動モーターにより動力を利用することができるようになった。それまでの動力の単位が馬力であるので、ここでは電力では一般的な動力単位であるkwも馬力の単位に換算して表すことにする。

表-1 ヒトと動物の筋力⁷⁾

	加えられた圧力 ^{*1)} (kgf)	速度 (m/s)	1 秒あたり圧力(kgf・m/sec)	比率
牽引馬	54	1.10	60	1.00
雄牛	54	0.73	40	0.66
ラバ	27	1.10	30	0.50
ロバ	14	1.10	15	0.25
ヒト (ポンプを押す場合)	6	0.76	4.5	0.076
ヒト (クランクを回す場合)	6	0.76	6.2	0.104

原注) 1馬力はおおよそ $75\text{kgf} \cdot \text{m/sec}$ または $4,560\text{kgf} \cdot \text{m/min}$ である。

加えられた圧力はここでは実効圧力であって、運搬重量によってではなく、動力計によって測定したものである。(原訳まま)

著者 注1) 1kgf (キログラム・フォース)は質量 1kg の物体に地球上の重力加速度

(9.8m/sec^2)が働いた場合の重さ(重量)であり、 $1\text{kgf}=9.806\text{N}$ (ニュートン=力の単位)となり、原訳の「圧力」の意味ではない。

注2) $1\text{kW}=1.341$ 馬力(horsepower)

3. 動力規模の歴史的拡大

動力の大きさ(馬力)を上のように定めて、横軸に西暦年を普通目盛りで、縦軸に動力の規模(馬力)を対数目盛りで表し、西暦年 t において出現した動力の大きさを馬力(horsepower)の対数でプロットしたもの^{8)~86)}が図-1である。

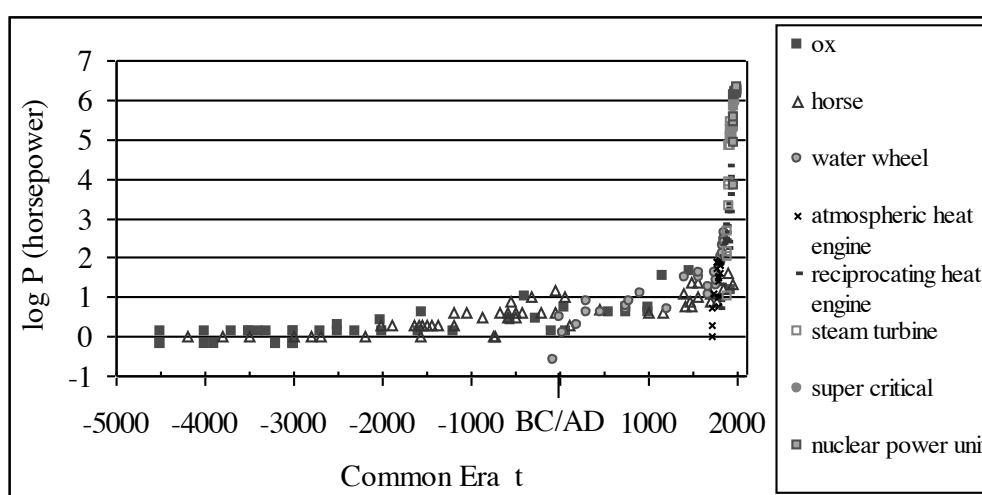


図-1 西暦年で表した出現動力(馬力: horsepower)の規模(紀元前の年代は負記号をつけて表す)

図－1 のデータは、使役に使われた雄牛(ox/oxen)については参考文献の[8]～[30]、馬(horse/horses)については[31]～[46]、水車(waterwheel)については[47]～[57]、熱機関の内のサベリー(Severy)、ニューコメン(Newcomen)、ワット(Watt) による大気圧エンジン(atmospheric heat engine)については[58]～[66]、高圧往復式蒸気エンジン((high pressure) reciprocating engine)については[66]および[67]～[70]、高圧蒸気タービン((high pressure) steam turbine)については[66]および[71]～[74]、超臨界圧蒸気タービン(supercritical – pressure steam turbine)については[75]～[82]、原子力発電 (nuclear power unit) については[83]～[87]に依っている。なお以後の記述では、上記の大気圧エンジンおよび高圧往復式蒸気エンジンを熱機関－1 (heat engine-1)と呼び、高圧蒸気タービンおよび超臨界圧蒸気タービンを熱機関－2 (heat engine-2)と呼ぶことにする。原子力発電はエネルギー源が異なるものの動力機械としては熱機関なので熱機関の中を含める。

一般に工業生産の拡大は時間 t に対し指数関数的に増大することが認められている。動力規模についても動力の拡大速度 dP/dt が動力規模 P に比例し、一定であると仮定すると

$$dP/dt=kP \quad (k \text{ は拡大定数で一定}) \quad (1)$$

と表される。 $t=t_0$ で $P=P_0$ として、この微分方程式の解は

$$\ln P = \ln P_0 + k(t - t_0) \quad (2)$$

と表され、 $\ln P$ は時間 t に対し線形となる。しかし図－1 に示されるように、動力の拡大速度は(1)式で表されるように P に対して 1 次より大きいべき数で増加している。そこで拡大速度が(1)式の 1 次よりも大きなべき関数 P^{r+1} ($r>0$) で表されると仮定すると

$$dP/dt=kP^{r+1} \quad (4)$$

となる。時刻 T をパラメータである積分定数として積分すると

$$P=1/[rk(Tc-t)]^{1/r} \quad (5)$$

両辺の対数をとると

$$\log P = (-1/r)[\log(rk) + \log(Tc-t)] \quad (6)$$

となる。よって P は $(Tc-t)$ の $(-1/r)$ 乗 ($r>0$) で増加し、有限の $t=Tc$ で発散し Tc は特異点となる。von Foerster ら¹⁾は世界人口の変動モデルとして特異点を含む(6)式の形を提案し、臨界年 Tc で人口爆発が起こると予言して問題になった。しかし特異点の存在で注意すべき点は、複雑な社会現象を単純化した数学モデルで特異点が導出されても現実の物理現象として発散が起こるとはむしろあり得ない。動力の歴史についても von Foerster らと同じモデル式を用い現実には発散が起こらないことを示し、その原因について考察する。

3.1 両対数で表した動力の拡大パターン

図－1 において AD2000 年を臨界年(Tc) と仮に定め、(6)式に基づきある動力が現れる西暦年 t から臨界年までの年数 $(Tc-t)$ の対数を横軸で表し、 $\log(Tc-t)$ に対して縦軸に出現動力を $\log P$ でプロットしたものが図－2 である。

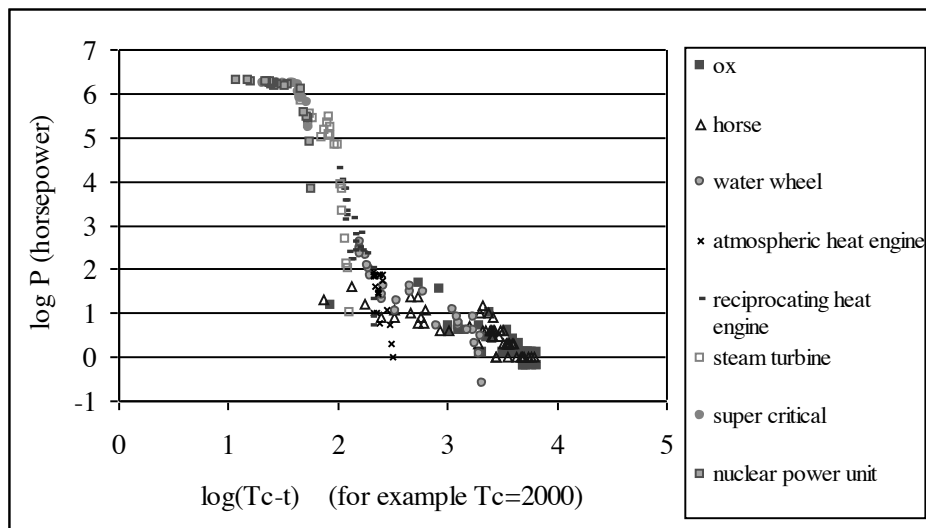


図-2 両対数座標で表した動力規模の分布（この図では仮に $T_c=AD2000$ 年とした）

3.2 臨界年 T_c の変化による最大動力パターンの変化

各動力種の最大馬力が作るパターンが T_c の変化によりどのように変化するかをみる。図-2 で熱機関（高圧蒸気タービン・発電機、原子力発電）、水車および畜力として雄牛を選び、臨界年 T_c を西暦 1950 年、2000 年、2100 年と設定した場合のこれらのパターン変化を図-3 に示す。なお図-3 では熱機関は一括して heat engine となっている。図-3 によれば設定する T_c が過去(1950 年)から将来(2100 年)に移行するほど熱機関のパターンは図の右方へシフトし、かつパターンの幅が変形して狭くなる。しかし、出現点が T_c から遠い過去に出現する水車および雄牛の動力パターンでは、設定する T_c の違いによるパターンの変化への影響が小さく、 T_c が 1950 年から 2100 年では水車および雄牛の動力パターンはそれぞれが殆ど重なって示される。そこで図-4 に図-3 の水車と雄牛の動力パターンを部分拡大して示した。 $\log(T_c-t) > 3$ では T_c の設定の違いによる水車および雄牛のパターンの違いは非常に小さく、殆ど重なってしまう。このように出現する時代が現代、中世、古代と異なると動力パターン群は T_c の違いにより特徴ある変化を示す。

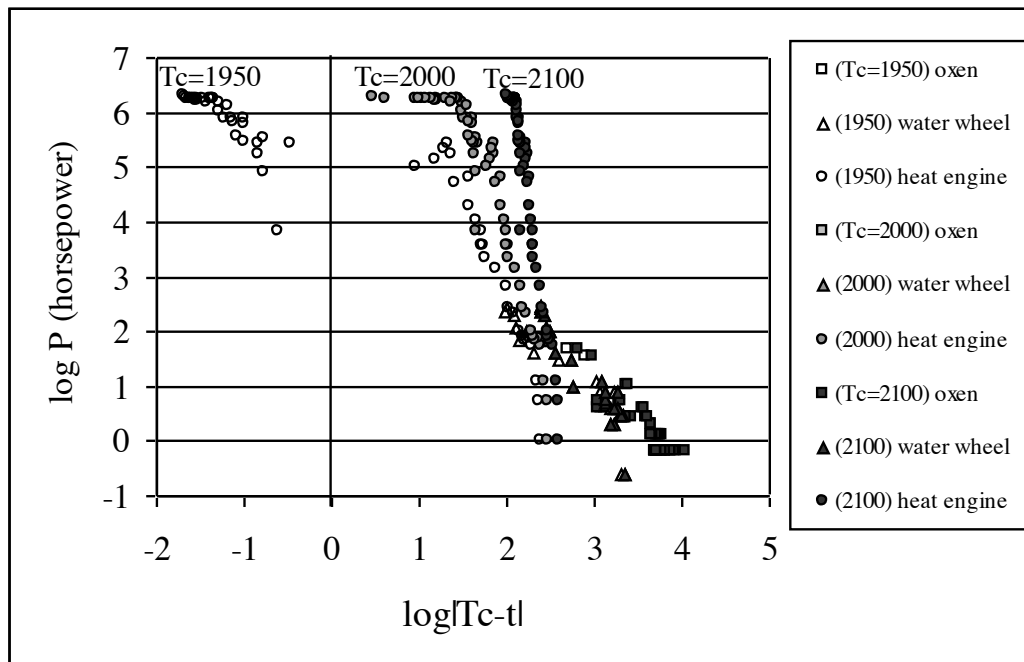


図-3 Tc を西暦 1950 年、2000 年、2100 年に設定した場合の熱機関と水車および雄牛の最大動力パターンの変化

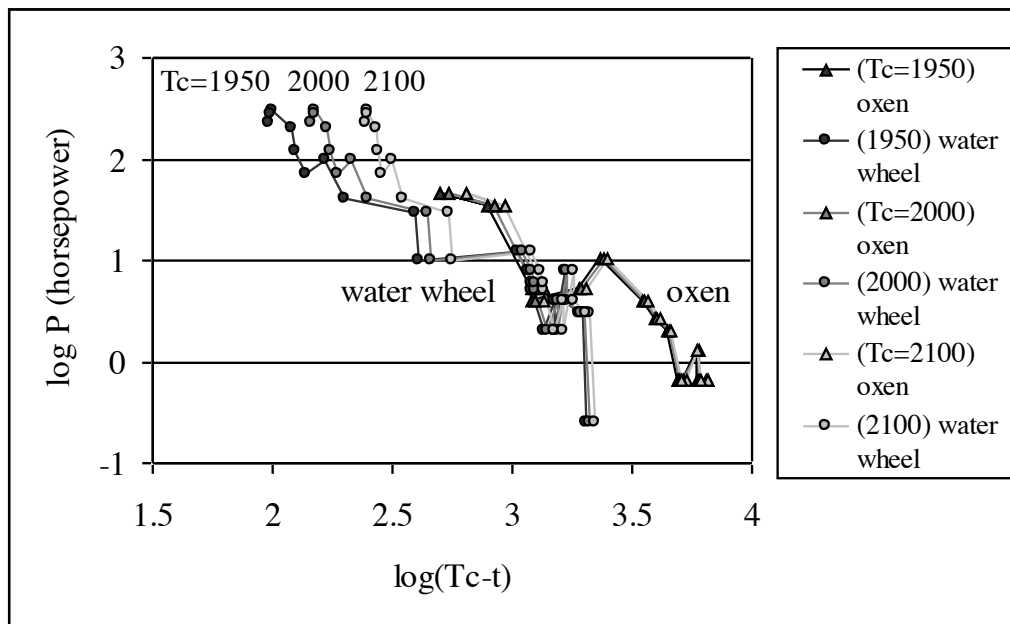


図-4 種々の Tc に対する水車および雄牛の最大動力のパターン変化 (図-3 の部分拡大)

3.3 熱機関と水車動力の拡大パターンの相似

上に述べた特徴ある変化を利用して、現代の熱機関(高圧蒸気タービン・発電機、原子力発電)が作る最大動力パターンが中世の動力(水車)パターンと相似となる Tc を見つけることを試みた。図-4 の水車動力のパターンは、図-5 a では heat engine-1, 2 の熱機関を示す図において、左上方の水平の出現点が下方へ曲がり、一時途切れた

後右下に下がるパターンに対応する。図-5 a は歴史の記録に残っている水車動力の出現データをすべて使用したものであるが、相似の可能性を示すには、水車のデータとして移動した熱機関のパターンの近くに分布するデータ点を使ったほうが良いだろう。図-5 a では水車動力が示す歴史データのばらつきが大きい、データをそのように限定すると図-5 b のようになる。

ここで熱機関と水車動力のパターンの相似性を調べるために、熱機関のパターンを平行移動して水車動力のパターンに重ねて見る。平行移動のパラメータを(a, b)として、熱機関の出現点 $[\log(Tc-t), \log P(Tc-t)]$ に加えると、熱機関の出現点の座標は

$$[\log(Tc-t)+a, \log P(Tc-t)+b]$$

となる。a が小さく b の絶対値が大きいほど、水車動力から熱機関動力に移ったときの動力規模の増大速度が大きかったことを意味している。ここで $Tc=2012$ と設定して移動パラメータ(a, b)を変化させて熱機関と水車動力のパターンの重なりを目視により(a, b)=(1.30, -4.58)と定めた。この移動パラメータにより熱機関のパターンの各要素を移動すると水車のパターンとは図-5 b の×印のように良い一致を示す。この移動パラメータのもとで Tc の設定を $Tc=2000\sim 2020$ 年の範囲で変化させて、熱機関と水車動力のパターンの相関係数(correlation coefficient)を求めると表-2 となり、 $Tc=2012$ で両パターンは最も相似性がよくなる。両パターンの相似性を重視して、以後では熱機関の特異年を $Tc=2012$ 年と設定することにする。

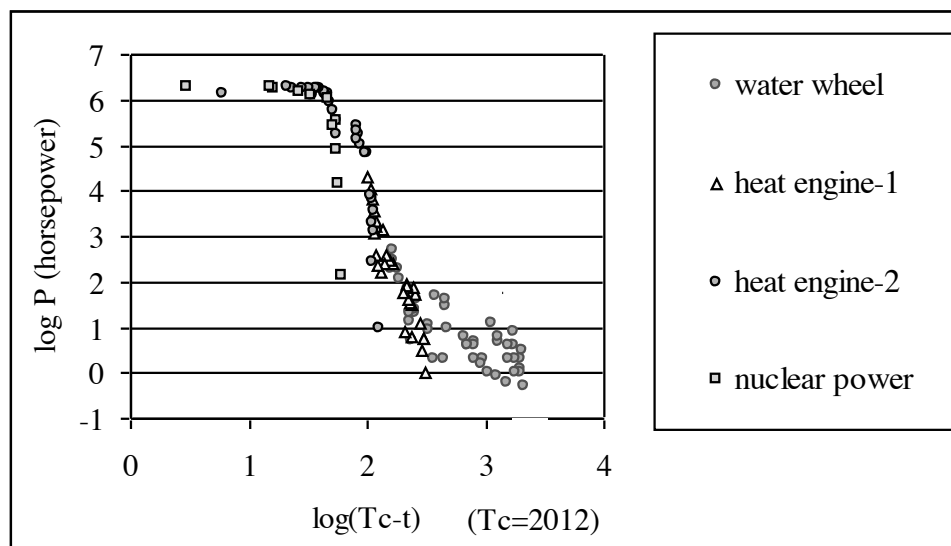
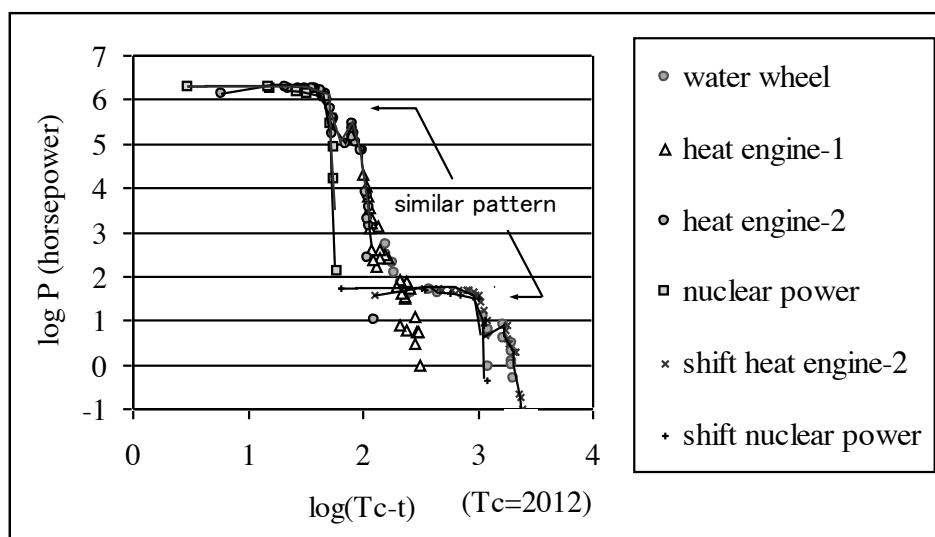


図-5 a $Tc=2012$ 年の水車と熱機関の出現パターン



図ー5 b 熱機関のパターンの近くに分布するデータ点に限定した水車と熱機関のパターンの相似

表ー2 種々の Tc に対する熱機関と水車のパターンの相関係数の変化

Tc	2000	2010	2012	2015	2020
Correlation coefficient	0.928	0.925	0.943	0.939	0.879

3.4 熱機関と雄牛動力および馬動力のパターン比較

水力よりさらに古い年代に出現した雄牛の動力拡大パターンと熱機関の相似性を見た。熱機関の heat engine-1,2 のパターンを 3.3 と同じく $T_c=2012$ と設定し、移動パラメータ (a, b) を $(1.98, -5.63)$ としたものである。雄牛の最小単位馬力が $P \geq 0.66$ ($\log P \geq -0.18$) であり、使役した雄牛の頭数の記述的不正確さ (ox と oxen の区別)、出現地域により使役頭数が違うなどのため、熱機関と雄牛動力のパターンの相関係数は 0.9086 と水車より低い、十分に相似であると言えよう。図ー6 に熱機関のパターンに移動パラメータ $(a, b) = (1.98, -5.63)$ を加え雄牛に移動したパターン (×印) を水力動力の拡大パターン (+印) と併せて示す。図ー6 から判るように、熱機関で右下に直線的に下がる直線部分の長さ ($\Delta \log P \approx 3.5$) は水車では ($\Delta \log P \approx 1.5$)、雄牛では ($\Delta \log P \approx 0$) と小さくなっている。従って「右下に直線的に下がる部分」については3者で一定長ではないがこれはそれぞれの動力に馬力(horsepower)の下限があるためである。

なお雄牛が動力に利用され始めてから(対数目盛で)わずかに後に馬が動力に利用され拡大した。利用される馬動力の大きさを雄牛と比較するため馬については最大馬力に限定せず、すべての歴史データを取り上げた。図ー6 に示すように馬動力の拡大パターンは熱機関動力の拡大パターン(従って雄牛や水車の拡大パターン)とは一致せず、これらとは同じ相似関係にはないことが判る。馬は主に騎馬やチャリオット(戦車)を曳く兵役のために使われたので利用目的が違うためであろう。

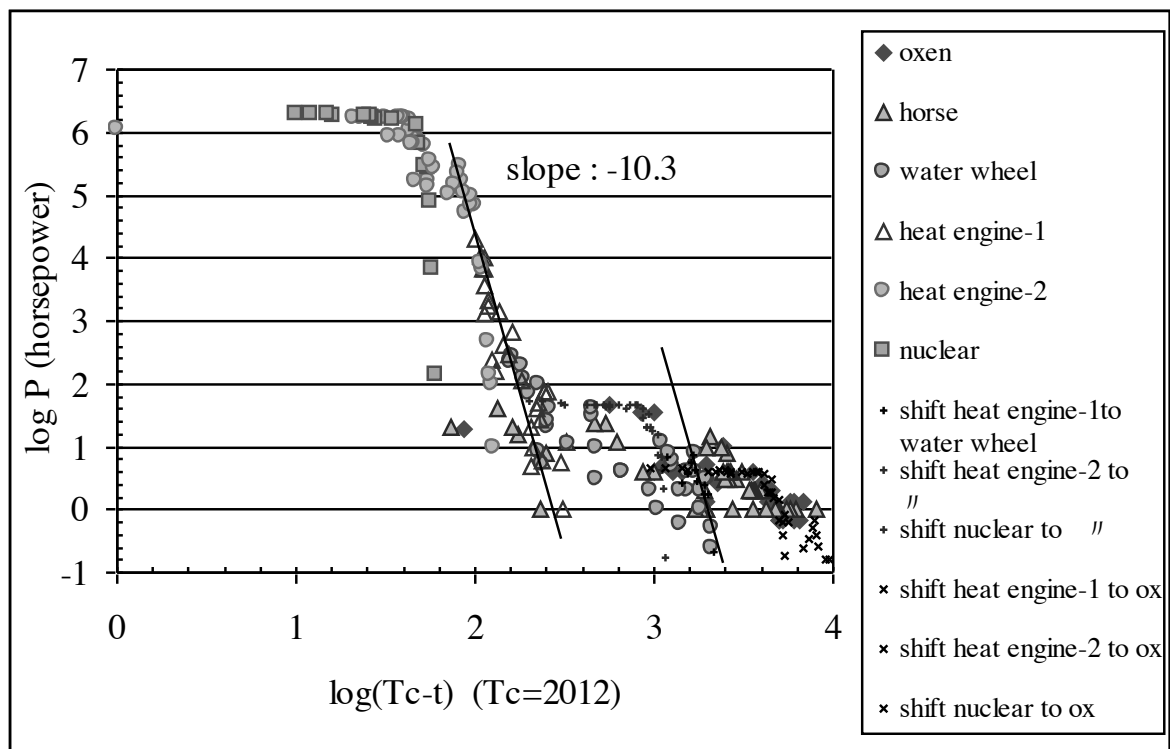


図-6 雄牛、水車および熱機関の動力拡大パターンの相似（比較のため馬の動力を示す）

3.5 熱機関動力拡大のべき乗則と臨界年の決定

パラメータ T_c を適切に選ぶことにより熱機関の動力拡大のパターンが水車や雄牛の動力拡大のパターンと相似になることを 3.3、3.4 で述べたが、熱機関動力の拡大(そして水車や雄牛の動力拡大)が (T_c-t) のべき乗則で拡大しているかどうかには触れなかった。

3.3 で述べた熱機関動力の拡大パターンの右下部につながる、直線と見なされる部分は(6)式から (T_c-t) のべき乗 $(-1/r)$ で表され、 $r > 0$ であるから数学的には $t = T_c$ で P は無限大に発散する特異点となる。そこで 3.3 と同じ T_c を設定し、直線と見なせる部分の相関係数 (R^2) とその勾配を求めた。その結果を表-3 に示す。与えられた各 T_c に対して $R^2 = 0.966 \sim 0.967$ と高い直線性を示す。

表-3 熱機関の直線部について T_c を変化した場合の $\log P$ の直線性 (R^2) と勾配 ($-1/r$)

T_c	2000	2010	2012	2015	2020
y 軸切片	22.646	24.719	25.13	25.757	26.797
勾配 ($-1/r$)	-9.3506	-10.169	-10.33	-10.575	-10.979
相関係数の二乗 (R^2)	0.9658	0.9665	0.9666	0.9667	0.9669

4. 対数周期性(Log-Periodicity)

A.Johansen と D.Somette³⁾ は

$$P(t) \propto (T_c - t)^z \quad (7)$$

で表されるべき乗則の指数 z を実数から複素数 $\beta+i\omega$ に拡張した。

$$P(t) \propto (Tc-t)^{\beta+i\omega} \quad (7')$$

そのとき実部を取ると(7)' 式右辺は $(Tc-t)^{\beta} \cos(\omega \ln(Tc-t))$ となる。このコサインの項は平均的なべき乗則の挙動をいわゆる $\log$ -Periodic な振動で補正することになる。彼らは世界人口や経済変動のデータを(8)の対数周期曲線による補正項を加えた式で解析する手法を提案した。

$$P(t) \approx A_1 + B_1 (Tc-t)^{\beta} + C_1 (Tc-t)^{\beta} \cos(\omega \ln(Tc-t) + \phi) \quad (8)$$

この対数周期曲線の手法を我々の動力の歴史的拡大に適用することを以下で試みる。

4.1 自然界の動力を利用した動力拡大の対数周期性

古代から近世にいたる自然界の動力(雄牛および水車)を利用する歴史データ群の中で最大動力を通る直線(図-7の黒線、 Y_I)をべき乗則の一般式である

$$\log Y_I = \log B_1 + \beta_1 \log(Tc-t) \quad (9)$$

と表すと、(9)式のパラメーターは $Tc=2012$ 年、 $B_1=3.40E+05$ ($\log B_1=5.531$), $\beta_1=-1.325$ となり、

$$\log Y_I = 5.531 - 1.325 \log(Tc-t) \quad (10)$$

と表される。この直線を図-7に示す。また参考のため 3.4、3.5 で述べた水車および雄牛の拡大のパターンをそれぞれ破線および点線で示した。

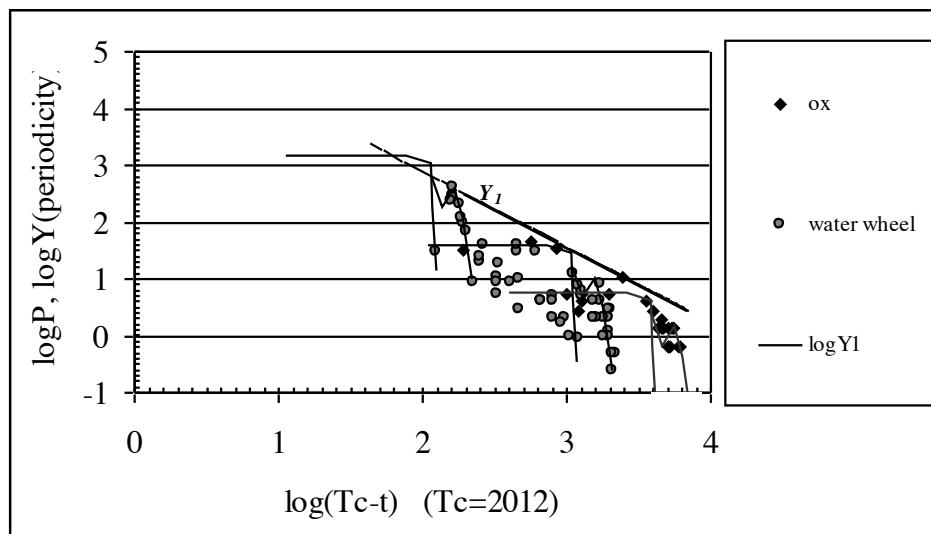


図-7 自然界の動力を利用した出現動力の最大値を結ぶ直線 Y_I

直線 Y_I 上にある歴史データは数が少ない(水車1点、雄牛2点)ので統計的意義の点で難点があるものの、直線 Y_I からのばらつきを対数周期曲線で補正する。(8)式のパラメーターは実際の雄牛と水車の動力値と対数周期曲線のズレ(偏差の二乗平均)が最小となるよう、パラメーターフィッティング法により定め $A_1=0$, $C_1=3.16E+05$, $\omega_1=3.696$ ($T_1=2\pi/\omega_1=1.7$), $\phi_1=1.2$ となった。このときの偏差の二乗平均は0.272である。その結果を $\log(Y_I * (\text{correction term}-1))$ として図-8に示す。

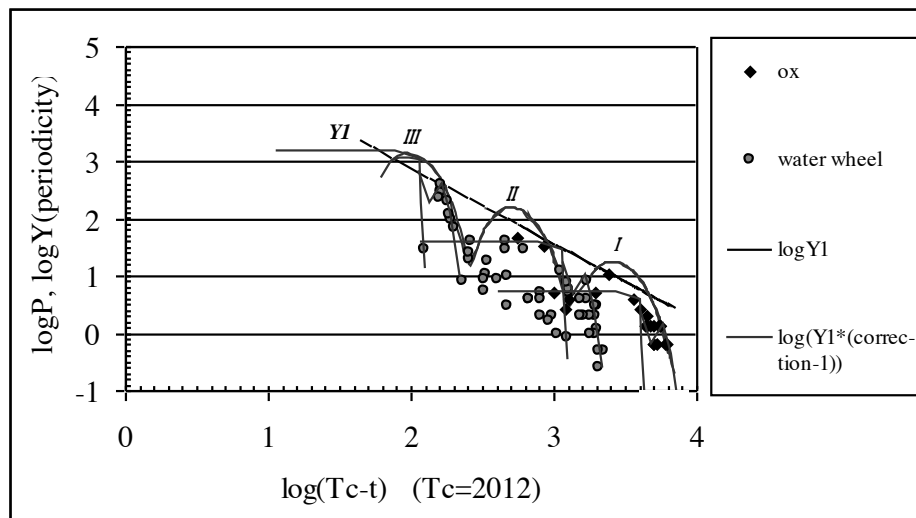


図-8 直線 $\log Y_1$ に対する Log-Periodic 曲線 $\log(Y_1 * (\text{補正項}-1))$

対数周期曲線は I , II , III のように周期的な曲線で表される。そして曲線 I は雄牛の、 II と III は水車の最大動力をカバーするものである。また歴史データの最低値は Y_1 に平行な直線に沿って出現し、対数周期曲線の極小値の位置は C_1 の大きさで決まる。曲線 III の半ばで水車動力の拡大が終わっているのは熱機関動力が出現したためである。

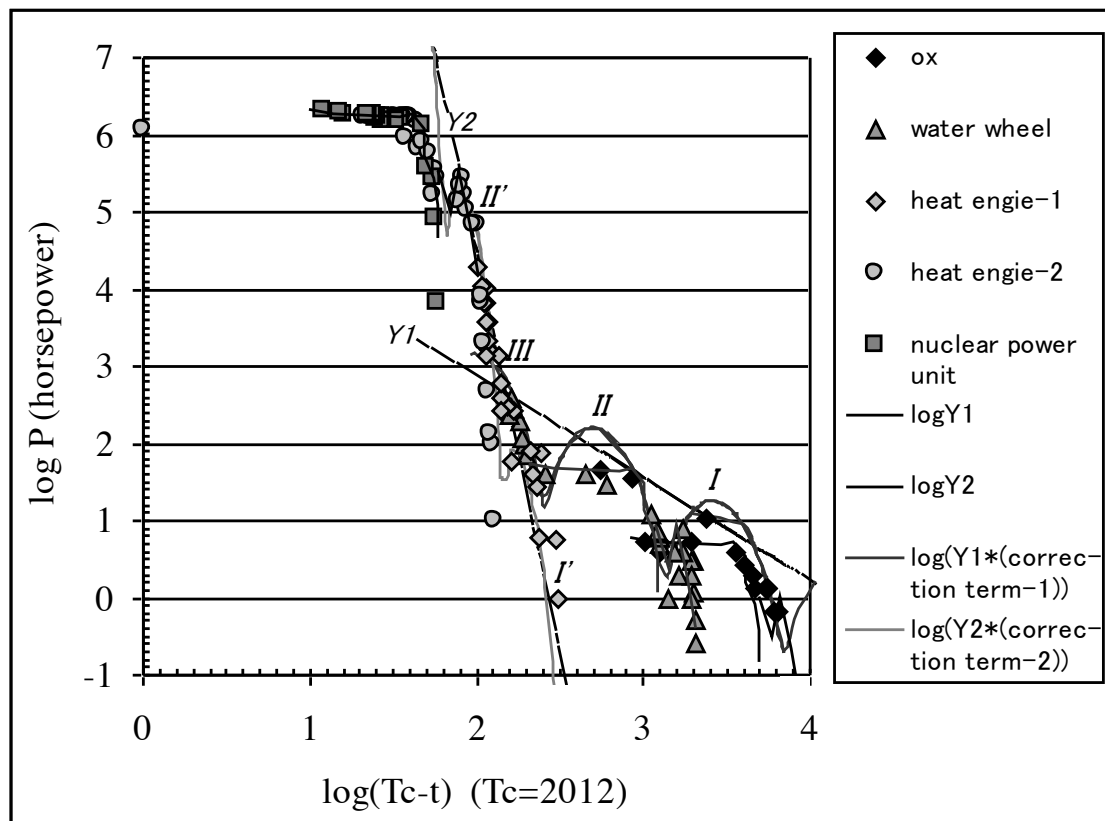
4.2 熱機関動力の対数周期性

Sevary (サベリー) や Newcomen (ニューコメン)、Watt (ワット) らにより発明された熱機関⁶²⁾は依然と自然動力 (大気圧) に依存するものであったが、1800 年に Trevithick (トレビシック) が大気圧に依存しない加圧蒸気による熱機関 (蒸気機関車) を発明し、さらに 1804 年に Evans (エバンス) らが高圧蒸気による熱機関で動力規模を拡大した。heat engine-1, 2 の加圧、高圧蒸気機関の動力拡大速度は雄牛や水車などの自然動力より大きいので、これらの動力の直線 $\log Y_1$ に代わって熱機関の最大動力を通る直線を (9) 式により $\log Y_2$ と新たに定めると

$$\log Y_2 = 25.13 - 10.33 \log(Tc-t) \quad (11)$$

となる (図-9 の直線、 Y_2)。直線 $\log Y_2$ を対数周期性の式 (8) で補正する。4.1 と同じくパラメーターフィッティング法により $A_1=0$, $C_1=1.34E+25$, $\omega_1=8.160$ ($T_1=2\pi/\omega_1=0.77$), $\phi_1=1.3$ と定めた。このときの偏差の二乗平均は 0.324 となった。その結果を図-9 に示す。

直線 $\log Y_2$ は $\log Y_1$ より勾配の絶対値が大きい。 $\log Y_2$ を補正する対数周期曲線 ($\log(Y_2 * \text{補正項}-2)$) の I' は heat engine-1 を、 II' は heat engine-2 を示す。曲線 I' の上昇は水車の曲線 II の低下と並行して生じており、heat engine-1 (大気圧エンジン) が水車動力を補完している。そして曲線 II' になると加圧蒸気機関 (heat engine-1 と-2) によって動力規模が急成長している。また水車動力についても鋼製の水車が製造されるようになって水車動力の規模が曲線 II から III へと大型化が始まり、これらにより社会は工業化時代に入ったことを示す。



図—9 熱機関動力の最大動力を結ぶ直線 $\log Y_2$ とそれを補正する対数周期曲線 $\log(Y_2 * (\text{補正項}-2))$
水車と雄牛の拡大直線 $\log Y_1$ とそれを補正する対数周期曲線 $\log(Y_1 * (\text{補正項}-1))$ を併せて示す

4.3 対数周期性のチェック

(8)式で表された $\cos$ の項 $\cos(\omega \ln(Tc-t) + \phi)$ の自然対数 $\ln$ を常用対数 $\log$ に変換し、また角速度 $\omega = 2\pi/T$ (T は周期) の関係を用いて $\cos$ の項を

$$\cos(2.303 (2\pi/T) \log(Tc-t) + \phi)$$

と表すと、(8)式は

$$\log P(t) \approx \log B + \beta \log(Tc-t) + \log[1 + (C/B) \cos(2.303 (2\pi/T) \log(Tc-t) + \phi)] \quad (8)'$$

と変形される。上式右边第1, 2項は直線 $\log Y_1$ を示し、上式右边第3項が $\log Y_1$ に対する補正項である。

4.1、4.2 で決定した対数周期曲線と $\log Y$ の差から $\log(Tc-t)$ に対する補正項の変化を求めることができる。その結果を図—10 に示す。

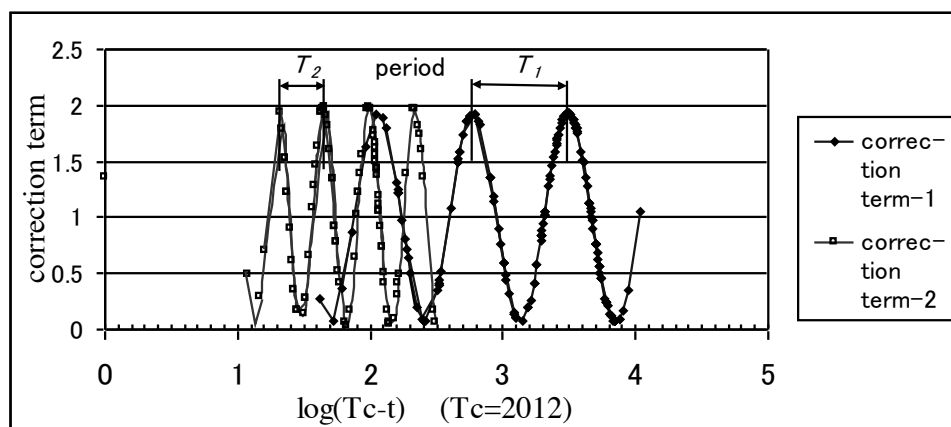
図-10 対数周期曲線の周期 T の違い

図-10 で補正項 1 (correction term-1) は Y_1 に対するもの、補正項 2 (correction term-2) は Y_2 に対するものである。図から各補正項が対数周期を描いており、雄牛と水車の自然動力群と熱機関群のそれぞれの周期 T を確認することができる。自然動力群の対数周期が $T_1 \approx 0.716$ (常用対数表示) に対して、熱機関群の周期は $T_2 \approx 0.334$ (常用対数表示) であり、熱機関の周期が約半分以下に短くなっている。 Y_1 の補正項 1 の曲線と Y_2 の補正項 2 の曲線が初めて交わった点 ($\log(Tc-t)=2.40, t=1760$) から工業化社会に入って熱機関動力の需要が増え、これと直線 Y_2 の勾配が急になっていることと相まって動力規模の拡大速度と変動が速くなっている。

4.4 熱機関動力(原子力発電を含む)の規模の拡大が停滞する理由

歴史データの蒸気タービンと超臨界圧蒸気タービン(これらを heat engine-2 とする)および原子力発電 (nuclear power unit) は図-9 の対数周期曲線 ($\log(Y_2 * \text{補正項-2})$) に示すように、2 回目の変動 II' の後に 3 度目の変動の極大に向けて急成長することではなく増大が頭打ちとなり、ほぼ水平に移行している (3.3 にて述べたパターン)。従って 2012 年にこれらの熱機関の動力規模が無限大となって臨界年となることはなかった。その原因を次に述べる。

蒸気機関の規模の拡大とその後の停滞をより詳しく見るため図-9 の停滞部分を拡大して図-9.1 に示す。

タービンによる熱機関は動力源となる蒸気の温度と圧力を上げることによって理論熱効率を上げてその規模を拡大してきた。蒸気条件(圧力、温度)により水の臨界点 (22.06Mpa, 373.95°C) を境に亜臨界圧 (subcritical)、超臨界圧 (supercritical: SC) に分類される。Heat engine-2 は V 形の落ち込みの前からのパターンを示す亜臨界圧によるボイラー・タービン発電プラントと、V 形の落ち込みの後に新しく現れ、ほぼ垂直に動力規模が上昇した後水平に移行している超臨界圧および超々臨界圧 (Ultra-Supercritical: USC) 蒸気のボイラー・タービン発電プラントに分かれる。US では亜臨界圧の発電プラントが稼働している中、1957 年に 16.8 万 hp (125MW)⁷⁵⁾、1960 年に 43.6 万 hp (325MW)⁷⁶⁾ の超々臨界圧発電プラントが試行された。これらのデモンストレーション・プラントには高温材料にニッケル (Ni) 基の合金も使われたが、経済的に成り立たないため蒸気条件を下げて超臨界圧発電プラントによる商業化が 1960 年⁷⁷⁾ から始まった。超臨界圧発電プラントはそれまでの最大規模である亜臨界圧発電プラントの規模 134 万 hp (1,000MW)⁷⁷⁾ を抜き、1972 年に世界最大規模の 174 万 hp (1,300MW) の石炭焚き超臨界圧発電プラントとなった⁷⁷⁾。この発電プラントは 1972 年から 1991 年まで合計 9 基が 19 年間にわたり建設され、稼働しており⁷⁷⁾、これが最大動力規模の拡大が停滞していると思われる一因である。

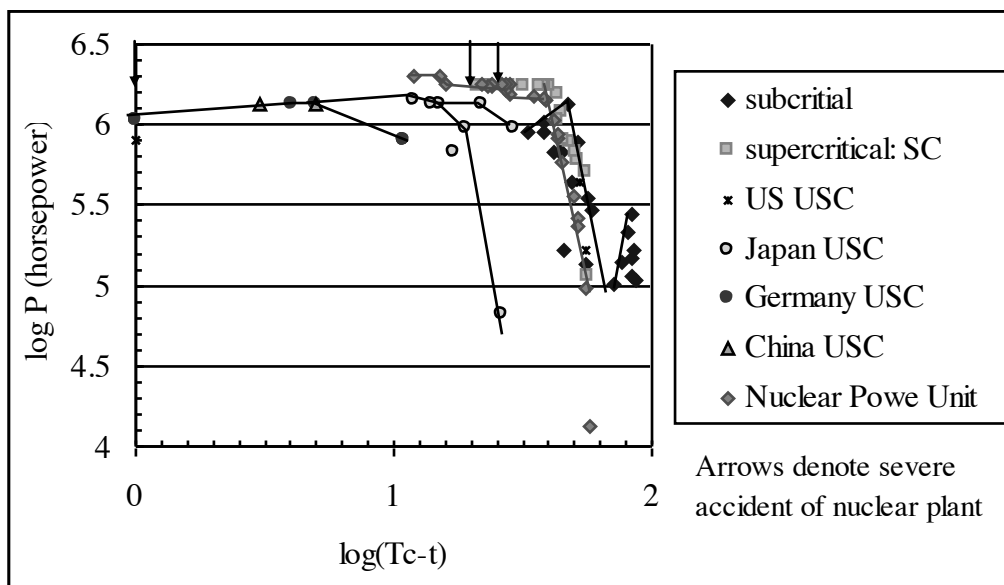


図-9.1 Heat engine-2 および原子力発電プラントの拡大図

USは1995年の「京都議定書」を批准しなかったためか、石炭火力発電所において熱効率を上げ排出CO₂を減らす超々臨界圧発電プラントの実用化が進まず、2012年に3基目の80万hp(600MW)の超々臨界圧発電が操業に入った⁷⁸⁾。一方日本、ドイツでは1990年頃から温暖化対策として熱効率を上げて排出CO₂を減らす134万hp(1,000MW)規模の石炭焼き超々臨界圧発電の商業プラントが現れているが^{79), 80), 81)}、これらはいずれも前出の最大規模を越えていない。これはタービン、ボイラー材料の高温強度特性からの制限によるものである⁸²⁾。

もう一つ新規に現れた熱機関は原子力発電プラントで、旧ソ連では1954年に世界最初の原子力発電所(黒鉛減速軽水沸騰冷却型)が稼働した⁸³⁾。USでは1957年に9.6万hp(72MW)の加圧水型(PWR)軽水炉が⁸⁴⁾、1960年には28万hp(210MW)の沸騰水型(BWR)軽水炉が⁸⁴⁾商業発電を行った。以後亜臨界圧の火力発電の規模がV字形の落ち込みから回復するのと並行してUSの両型式の軽水炉は規模を増大し、1973年に147.5万hp(1100MW)まで急成長するが⁸⁴⁾、USのThree Mile Island発電所(1979)、ウクライナのChernobyl発電(黒鉛減速軽水沸騰冷却型)(1986)、日本の福島第一軽水炉発電3基(BWR)(2011)で炉心がメルトダウンする過酷事故(図-9.1に矢印で示す)が起こったため世界的に原子力発電に対する安全性のチェックが厳しくなり、USではNRC(原子力規制委員会)が最後の新設の許可をした1978年の後、新たな原子力発電所の建設が凍結されている(2012年2月に2基の新設を許可⁸⁵⁾)。フランスでは1990年に178万hp(1330MW)、2000年に201万hp(1500MW)と新設が続いている⁸⁶⁾が総じて規模の拡大速度は鈍い。これは軽水炉では普通の水(軽水)を中性子の減速材にもタービンを動かす熱媒体にも使用しており、化石燃料焼きのボイラーのように高温・高圧の蒸気にして出力の増大を図ることが望めず(石炭焼き火力発電の熱効率が38~44%(USCでは47%)であるのに対し軽水炉の熱効率は33~36%である)、またタービンを大形化すると飽和蒸気となって生成する水滴によりタービン翼に浸食が起こるためである⁸⁷⁾。以上のように、火力発電、原子力発電ともその理由はそれぞれ異なるが、熱機関による動力規模の拡大は1973年以来停滞している。

5. 太陽光発電 次の動力?

熱機関による最大規模の拡大が今後とも停滞すると仮定した場合、熱機関に代わって有望視されているのは太陽光発電(photovoltaic)である。そこで太陽光発電による動力の拡大もべき乗則に従うものとし、今後の拡大を予測してみる。

5.1 太陽光発電の利用形態

太陽電池は太陽の光のエネルギーを吸収して直接電力に変換する変換器であり、初めは人工衛星の電源用に搭載された。1980年代にオイル・ショックで太陽電池の開発ブームが起こり、シリコン結晶系太陽電池が急成長した。1990年代から地球温暖化対策のため、再び太陽電池の開発ブームが起こっている。

現在の太陽電池の開発は2つに分かれる。1つは発電規模が比較的小さい設備を住宅や店舗に設置し、熱機関による大型発電所からの電力と併せて電力需要を補うものである。もう1つは日射量の多い砂漠などに太陽光発電所を設置し、熱機関による大型発電所と同等あるいはそれ以上の規模の発電を行い、既存の送電線に繋いで不特定多数への電力供給を行おうとするものである。

ここでは熱機関による大型発電所と比較するために、後者のタイプを選び、一ヶ所の太陽光発電プラントの最大出力が今後どのように変化するかを見ることにする。

5.2 太陽光発電の最大出力の経過

図-11 に太陽発電システムの最大発電規模(ピーク出力 kW)の推移を示す^{88)~97)}。1960年代から小規模な太陽光電池が試験的に作られ人工衛星などに搭載された。1974年に起こったオイル・ショックにより Si 結晶系の太陽光発電の開発が盛んとなり、1980年から太陽光電池が商業的に供給され始め、最初の1MWの発電所が建てられた。これは太陽光発電の集光効率を上げるために2軸の追尾装置を備えたものである。このタイプの太陽光発電は6MWまで出力を拡大した。1993年には追尾装置のない500kW太陽光発電が既設の火力発電所の送電網に初めて接続された。しかし太陽光発電の発電コストが高いためその後太陽光発電の開発は低調となった。2000年に入ると地球温暖化対策として太陽光発電の開発が再び活発となり、単結晶 Si の発電コストを下げるために追尾装置を備えたものや薄膜 Si、さらに CdTe による大型光発電所が建設されている。2012年以降に計画されているものの中にはサハラ砂漠の砂を原料として Si 単結晶を製造して太陽光発電を行い、これからの電力によって Si 単結晶を製造して太陽光発電所を2年ごとに倍増する「サハラ・ソーラー・ブリーダー計画」が検討されている⁹⁷⁾。

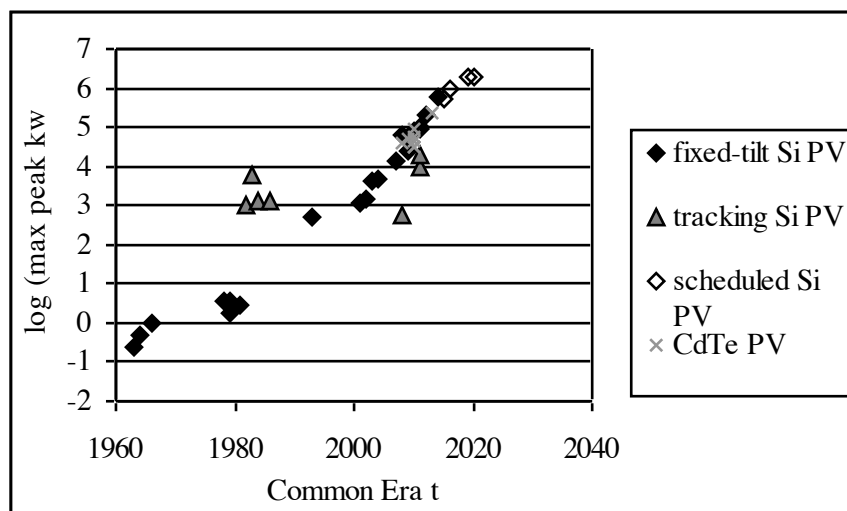


図-11 太陽発電システムの最大ピーク出力 kW の推移

図-12に今までの臨界年 $T_c=2012$ 年のグラフに太陽光発電の規模の変遷をプロットしたパターンを示す。2011年までの太陽光発電の最大規模の拡大は湾曲しておりべき乗則を示す直線を定め難い($T_c=2012$ 年の座標軸では2011年までしかプロットできない)。よって太陽光発電の臨界年は $T_c=2012$ 年ではない。

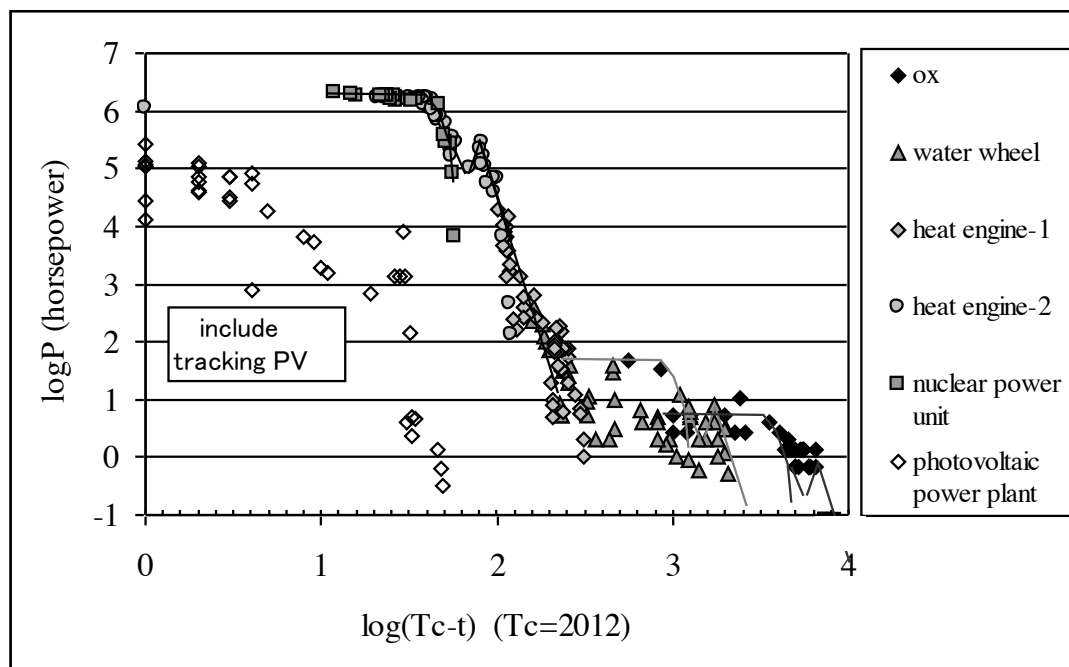


図-12 $T_c=2012$ 年の座標軸にプロットした太陽光発電とこれまでの動力規模のパターン

5.3 Si 太陽光発電の臨界年 T_c の決定

我々は3.3で熱機関と水車動力のパターンの相似性が最もよくなる点として臨界年 T_c を定めた。ここでも太陽光発電と熱機関のパターンの相似性が最もよくなる点として T_c を求めよう。相似性の指標として両パターンの直線部分の勾配を臨界年 T_c の関数として求めると図-13となり、 $T_c=2038.5$ で両者が一致するので、太陽光発電の臨界年は $T_c=2038.5$ と決定する。

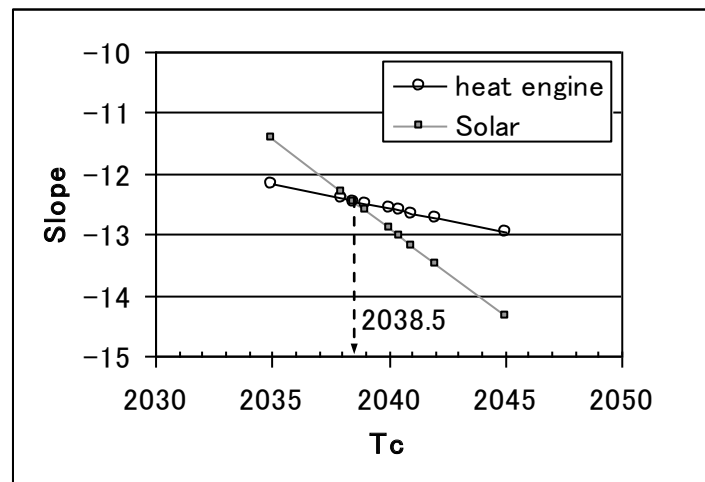


図-13 T_c の変化による熱機関と太陽光発電の勾配の変化

このとき図-14 に示すように、

太陽光発電プラントの2012年までの分布は(12) 式のように直線 $\log Y_3$ で表される。

$$\log Y_3 = 23.04 - 12.457 \log \log (T_c' - t) \quad (R^2 = 0.972) \quad (12) \text{ (ピンク直線)}$$

熱機関の直線部については(13) 式のように直線 $\log Y_3$ で表される。

$$\log Y_3' = 30.662 - 12.457 \log \log (T_c' - t) \quad (R^2 = 0.967) \quad (13) \text{ (黄色直線)}$$

熱機関、太陽光発電とも直線部の勾配は-12.457 となる。勾配が一致するとき次に示すように相似性は最大となる。そこで相似性最大を条件として臨界年は $T_c' = 2038.5$ と定める。

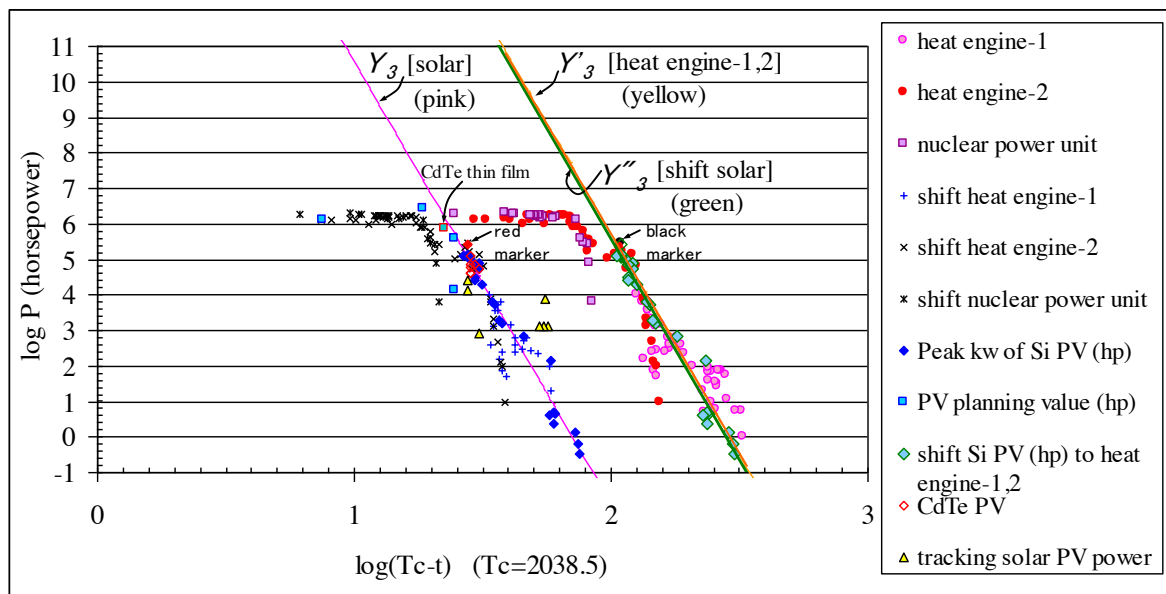


図-14 $T_c = 2038.5$ における太陽光発電 Y_3 と熱機関の直線 Y_3' および移動した太陽光発電 Y_3''

以上では直線部分の勾配の一致を変動パターンの相似性の条件として見てきたが、以下ではより詳しく相似性のチェックをする。図-14 において太陽光発電の直線性は赤◇印でマーキングしたピーク値で終わっている。一方で熱機関の直線部分も黒◇印でマーキングしたピーク値以後直線から外れている。このピーク値の出力は両者

で一致していて $\log P=5.428$ (hp) である。太陽光発電の今後の発展については不確かであるが、熱機関と同じくここで停滞期に入ると仮定して、このピーク値以下での両者のパターンの相似性を調べて見る。

そのために太陽光発電のパターンを平行移動して熱機関のパターンに重ねる。縦軸 ($\log P$) の上限値が同じなので移動は水平で移動パラメータは $(a, b)=(-0.60, 0.0)$ となる。移動したパターンを図-14 で緑色の直線 $\log Y_3''$ と薄緑色の◇印で示す。これと熱機関の直線(13)式 (黄色の直線) とは一致し、heat engine-1 および heat engine-2 のピンクと赤の各点のパターンとは良い一致をしめす ($R^2=0.972$)。よって $T_c=2038.5$ としたときに heat engine-1, -2 と太陽光発電の変動パターンは相似であると言える。

5.4 太陽光発電の対数周期曲線と到達規模の予想

太陽光発電プラントの最大発電規模 $\log Y_3$ を対数周期性の式(8)で補正する。4.2 と同じくパラメータフィッティング法により $A_3=0, C_3=1.06E+23, \omega_3=22.44$ ($T_3=2\pi/\omega_3=0.28$), $\phi_3=1.5$ と定めた。このときの偏差の二乗平均は 0.392 となった。その結果を図-15 に示す。対数周期曲線は図-15 に示すように 4 つ以上の極大値を持つ紫色の曲線 ($\log(Y_3*(\text{correction term}-3))$) となる。曲線 I から III の前半までは 2012 年までに実際に建設された太陽光発電プラントの最大発電規模によく追従している。その後 2013 年までに発表された将来の計画値の規模(青色□)^{94)~96)} は対数周期曲線の曲線 III の後半から IV の始めに曲線の近くに分布するが、我々の分析では熱機関の停滞のパターン(×, * 印)は対数周期曲線に沿わず、最大規模は $\log P(\text{hp})=6.25, P=1.78 \times 10^6 \text{ hp} (=1.33 \text{ GW})$ の横ばい状態(青色破線)となる。よって太陽光発電プラントの発電規模は臨界年の $T_c'=2038.5$ 年において発散する前に停滞期に入り、その後に新しい技術発展を迎えるだろう。

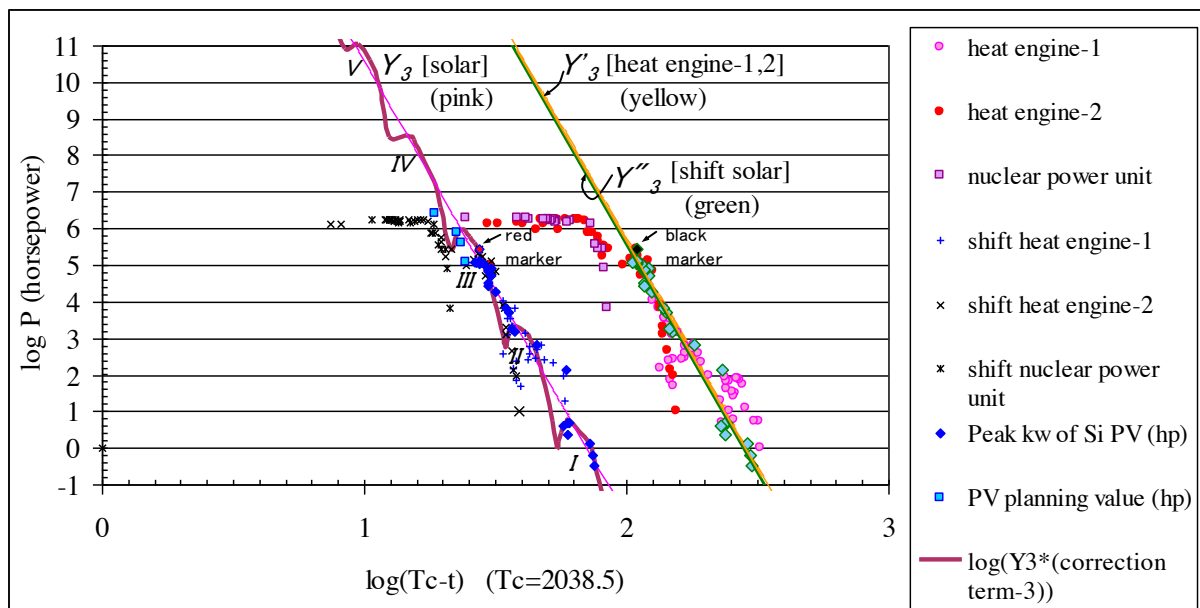


図-15 太陽光発電プラントの最大発電規模を結ぶ直線 $\log Y_3$ (ピンク色) とそれを補正する対数周期曲線 (紫色)

太陽光発電は熱機関のような可動部分や高温にさらされる部分がないため材料強度面からの制約はないので、規模拡大が停滞する理由としては大規模になってもスケールメリットが小さく発電コストが熱機関に対して高い(従って補助としての買い取り金額が増える)。あるいは広大な面積を必要とするため土地の利用面についての制度的制約が生ずる、Si 半導体の原料の資源的な問題などが考えられる。2020 年以後に大規模熱機関と同等の太陽光発電プラントが実証的に運転されることにより上述の技術的、社会制度的問題点が具体的に明らかとなり、

$T_c=2038.5$ 年を越えてからは Si より変換効率の高い半導体による太陽光発電の開発、土地利用制度の大幅な改革などが起こると考えられる。

6. 結論

長い歴史時間にわたって人間社会の主たる動力の種類は人力から雄牛、水車そして熱機関へと遷移し、その間も動力規模は絶え間なく拡大してきた。モデル式によれば、これらによる最大動力の規模はべき乗則に従って拡大し、臨界点が存在して発散するとされる。しかし人間社会の歴史の中で動力規模が実際に臨界点に達し発散したことはなく、現在の熱機関動力についても予測された臨界年を越えても拡大が鈍化あるいは停滞しつつ存在している。これは動力機器が備えなければならない特性 (制御性、材料強度) が不十分のまま臨界点に近づくとも規模の拡大が鈍化あるいは停滞し、その間に新しい動力種が現れるためと考えられる。熱機関の次に現れる新しい動力種としては材料強度などの制約がない Si 太陽光発電による大型プラントが今までの熱機関動力の拡大パターンと相似で拡大するものと考えられ、その到達しうる最大規模とその時期を予測した。

[参考文献]

- 1) Heinz von Foerster, Patricia M. Mora, Lawrence W. Amiot; Doomsday: Friday, 13 November, A.D. 2026, Science 132, pp. 1291-1295, 1960.
 - 2) Andrey V. Korotayev; Globalization and Mathematical Modeling of Global Development の脚注 2 at http://www.socionauki.ru/book/files/globalistics_and_globalization_studies/148-158.pdf, accessed 2013-8-20
 - 3) A.Johansen and D.Sornette; Finite-time singularity in the dynamics of the world population, economic and financial indices, Physica A 294 (2001) 465-502
 - 4) Greater Anatolia and the Indo Hittite Language Family, at <http://slavic.uchicago.edu/archived/papers/darden-anatolia.pdf>, accessed 2013-3-17
 - 5) Elio Lo Cascio, Paolo Malanima; Mechanical Energy and Water Power in Europe A Long Stability? at http://www.paolomalanima.it/DEFAULT_files/Articles/Water_Power.pdf, accessed 2013-8-20
 - 6) Robert T. Balme, Modern Engineering Thermodynamics, Academic Press, 2011
 - 7) J. ギャンペル, 坂本賢三 訳, 中世の産業革命, 岩波書店, 1986
- 雄牛 (ox)**
- 8) The Oxen Handbook, at <http://www.angelfire.com/ky/rmfarm/oxenhandbook.html>, accessed 2013-3-17
 - 9) Invention of the Plough, at http://www.wisedude.com/inventions_discoveries/plough.htm, accessed 2013-3-17
 - 10) HISTORY OF TECHNOLOGY Yoke and harness: from 4000 BC, at <http://www.historyworld.net/wrldhis/PlainTextHistories.asp?historyid=ab11>, accessed 2013-3-17
 - 11) CIVILIZATION BEGINS: THE COPPER-STONE AGE, 3600-2800 B.C., at <http://www.portergaud.edu/academic/faculty/mcarver/cmcarver/civ.html>, accessed 2013-3-17
 - 12) Animal-Drawn Plow, at <https://sites.google.com/a/brvgs.k12.va.us/wh-11-sem-1-ancient-india-fgln/animal-drawn-plow>, accessed 2013-3-17
 - 13) Michael Baizerman, Dawn and Sunset : Insight into the Mystery of the Early Mesopotamian Civilization, Strategic Book Publishing, 2012
 - 14) Thomas Levy, The Archaeology of Society in the Holy Land, Continuum International Publishing Group, 1998
 - 15) HOW INDO-EUROPEAN LANGUAGES MIGHT HAVE SPREAD, at http://www.e-reading.org.ua/chapter.php/73183/33/Diamond_-_The_rise_and_fall_of_the_third_chimpanzee., accessed 2013-3-17

- 16) The history of working animals in Africa, at <http://www.animaltraction.com/StarkeyPapers/Starkey-HistoryAnimalTractioninAfrica-97-draft.pdf> , accessed 2013-3-17
- 17) Michael Woods, Mary B. Woods, Ancient Agricultural Technology: From Sickles to Plows, Twenty-First Century Books, 2011/01/01
- 18) 近藤英夫, 四大文明 インダス, NHK 出版, 2000
- 19) CHAPTER 6. AGRARIAN SOCIETIES, at <http://www.des.ucdavis.edu/faculty/Richerson/BooksOnline/He6-95.pdf> , accessed 2013-3-17
- 20) Maude De Schauensee, Two Lyres from Ur, UPenn Museum of Archaeology, 2002
- 21) COUNTRY LIFE IN ANCIENT EGYPT, MUSEUM OF FINE ARTS, BOSTON, at http://www.gizapyramids.org/pdf%20library/smith_country_life.pdf , accessed 2013-3-17
- 22) Building in Egypt; Pharaonic Stone Masonry (New York and Oxford 1991) CHAPTER VI Tools and Their Application, at <http://hbar.phys.msu.ru/gorm/ahist/arnold/arnold.htm> , accessed 2013-3-17
- 23) Chapter 3 - The Military Revolution Logistics and Transport, at <http://www.au.af.mil/au/awc/awcgate/gabrmetz/gabr000a.htm> , accessed 2013-3-17
- 24) ラスロー・タール, 馬車の歴史, 平凡社, 1991
- 25) リン・ホワイト, 中世の技術と社会変動, 思索社, 1985
- 26) Colosseum Calculation Assumptions, at <http://www.theupsideofdown.com/pdf/theupsideofdown-colosseum-assumptions.pdf> , accessed 2013-3-17
- 27) The Medieval Technological Revolution, at <http://www.clemson.edu/caah/history/FacultyPages/PamMack/lec122/medag.htm> , accessed 2013-3-17
- 28) J. ギャンペル, 中世の産業革命, 岩波書店, 1986
- 29) Dr. Judith A. Weller, ROMAN TRACTION SYSTEMS, at <http://www.humanist.de/rome/rts/load.html> , accessed 2013-3-17
- 30) The Cannons of Les Invalides, Paris, at <http://traveltoeat.com/the-cannons-of-les-invalides-paris/> , accessed 2013-8-20
- 馬 (horse)**
- 31) HOW INDO-EUROPEAN LANGUAGES MIGHT HAVE SPREAD, at http://www.e-reading.org.ua/chapter.php/73183/33/Diamond_-_The_rise_and_fall_of_the_third_chimpanzee. , accessed 2013-3-17
- 32) Alan K. Outram, et al, The Earliest Horse Harnessing and Milking, Science 6 March 2009: vol. 323 no. 5919 pp. 1332-1335
- 33) The History of Transportation, at <http://www.portfoliolhalina.com/transport/wheel.html> , accessed 2013-3-17
- 34) Indo-Iranians, at <http://en.wikipedia.org/wiki/Indo-Iranians> , accessed 2013-3-17
- 35) The Politico-Economic Impact of the Horse on Old World Cultures: An Overview, at http://www.sino-platonic.org/complete/spp190_horse_old_world.pdf , accessed 2013-3-17
- 36) History of ancient Egypt, at http://en.wikipedia.org/wiki/History_of_ancient_Egypt , accessed 2013-3-17
- 37) ラスロー・タール, 馬車の歴史, 平凡社, 1991
- 38) Ancient-Greece.org Propylaia, at <http://www.ancient-greece.org/architecture/propylaia.html> , accessed 2013-3-17
- 39) J. ギャンペル, 中世の産業革命, 岩波書店, 1986
- 40) Dr. Judith A. Weller, ROMAN TRACTION SYSTEMS, at <http://www.humanist.de/rome/rts/load.html> , accessed 2013-3-17
- 41) S.リリー, 人類と機械の歴史, 岩波書店, 1983

- 42) Ernest T. Fretwell, Coal Mining – a general history – Timeline, at http://www.durhamintime.org.uk/Durham_Miner/Coal_Mining_Timeline.pdf , accessed 2013-3-17
- 43) Thomson Gale, Combine Harvester from World of Invention, at <http://www.bookrags.com/research/combine-harvester-woi/> , accessed 2013-3-17
- 44) Domenigoni Valley, at <http://www.domenigonivalley.net/history.htm> , accessed 2013-3-17
- 45) Paul Keith Conkin, A Revolution Down on the Farm: The Transformation of American Agriculture Since 1929, University Press of Kentucky, 2008
- 46) Harvesting wheat with a horse drawn combine, The Dalles, at <http://historicphotoarchive.com/capsmonner/monner4282.htm> , accessed 2013-3-17

水車 (water wheel)

- 47) J. ギャンペル, 中世の産業革命, 岩波書店, 1986
- 48) T.S. レイノルズ, 水車の歴史, 平凡社, 1989
- 49) Munro, John H., Industrial energy from water-mills in the European economy, 5th to 18th Centuries: the limitations of power, at <http://ideas.repec.org/p/pra/mprapa/11027.html> , accessed 2013-3-17
- 50) Horizontal Tide Mill at Nendrum, at <http://dnausers.d-n-a.net/dnetclgs/tmill/capacity.htm> , accessed 2013-3-17
- 51) アフマド・T・アルハサン, ドナルド・R・ヒル, イスラム技術の歴史, 平凡社, 1999
- 52) The Davistown Museum Precursors of the Blast Furnace, at <http://www.davistownmuseum.org/toolPreBlastFurnace.html> , accessed 2013-3-17
- 53) John H. Munro, Industrial Energy from Water-Mills in the European Economy, 5th to 18th Centuries: the Limitations of Power, at <http://www.economics.utoronto.ca/munro5/MunroDatini34Energy.pdf> , accessed 2013-3-17
- 54) Quarry Bank Mill, Stya, <http://www.mykp.co.uk/places-to-visit/quarry-bank-mill-styal/> , accessed 2013-3-17
- 55) Davistown Musium Citations and Annotations from Waterpower, at <http://www.davistownmuseum.org/CitationsHunter.html> , accessed 2013-3-17
- 56) 門脇重道, 科学史研究 Vol.25 No.160, 1986
- 57) Alec Westley Skempton 編集, 1500-1830, Thomas Telford, 2002

熱機関 (大気圧エンジン atmospheric heat engine)

- 58) T. K. Derry, Trevor I. Williams, A Short History of Technology: From the Earliest Times to A.D. 1900, Courier Dover Publications, 1993
- 59) BBC - History - Historic Figures: Thomas Newcomen (1663 - 1729), at http://www.bbc.co.uk/history/historic_figures/newcomen_thomas.shtml , accessed 2013-3-17
- 60) Part one of the first printed words of a group of scientists who applied their science to the social field., at <http://www.vcn.bc.ca/~educator/intro1.htm#top> , accessed 2013-3-17
- 61) 2. The British Industrial Revolution, 1760-1860, Gregory Clark, at <http://www.econ.ucdavis.edu/faculty/gclark/ecn110b/readings/chapter2-2002.pdf> , accessed 2013-3-17
- 62) Sebastian Teir, The History of Steam Generation, at http://www.energy.kth.se/compedu/webcompedu/ManualCopy/Steam_Boiler_Technology/Basics_of_steam_generation/history_of_steam_generation.pdf, accessed 2013-3-17
- 63) The Motor Musseum in Miniature Richard Trevithick, at <http://www.themotormuseuminminiature.co.uk/inv-richard-trevithick.php>, accessed 2013-3-17
- 64) Birmingham Musium of Science and Industry 資料より 坂田出張メモ
- 65) Arkwright's Mill, NCP Car Park, Miller Street, Manchester, at <http://ja.scribd.com/doc/13103466/Arkwrights-Mill-Manchester> , accessed 2013-3-17

- 66) 石谷清幹、蒸気動力史論 第一報：陸用蒸気原動機単位出力発達史論, 科学史研究,
第 32 号, 1954 年

熱機関 (高圧往復式蒸気エンジン (high pressure) reciprocating heat engine)

- 67) Richard Shelton Kirby, Engineering in History, Courier Dover Publications, 1990

- 68) IEEE Global History Network, at http://www.ieeeahn.org/wiki/index.php/The_Railway_Power_Stations_of_New_York_City, accessed 2013-3-17

- 69) S.リリー, 人類と機械の歴史, 岩波書店, 1983

- 70) Henry Winram Dickinson, A Short History of the Steam Engine, Cambridge University Press, 2011

熱機関 (高圧蒸気タービン (high pressure) steam turbine)

- 71) Ferrybridge CCPilot 100+ Power Station, United Kingdom, at

<http://www.power-technology.com/projects/ferrybridge-ccpilot-100-power-station/>, accessed 2013-3-17

- 72) "Electricity Supply in the UK: A chronology" Electricity Council, c. 1987 Battersea station, at

http://www.etk.ee.kth.se/personal/nt/elecpow/history/electricity_supply_in_the_uk_a_chronology_ocrnopic.pdf,
accessed 2013-3-17

- 73) Post World War II "Golden Years", at <http://americanhistory.si.edu/powering/past/h2main.htm>, accessed 2013-3-17

- 74) POWER STATIONS AT LITTLEBROOK: INNOVATION IN ELECTRICITY GENERATION, at

http://www.dartfordarchive.org.uk/technology/power_littleb.shtml, accessed 2013-3-17

熱機関 (超臨界圧蒸気タービン supercritical-pressure steam turbine)

- 75) Philo 6 Steam - Electric Generating Unit, at <http://files.asme.org/asmeorg/communities/history/landmarks/1476.pdf>,
accessed 2013-3-17

- 76) EDDYSTONE STATION, 325 MW GENERATING UNIT 1, at

<http://files.asme.org/ASMEORG/Communities/History/Landmarks/1500.pdf>, accessed 2013-3-17

- 77) Babcock & Wilcox Company Supercritical (Once Through) Boiler Technology, at

<http://www.babcock.com/library/pdf/br-1658.pdf>, accessed 2013-3-17, accessed 2013-3-17

- 78) http://www.energyonline.com/Industry/News.aspx?NewsID=7609&SWEPCO's_Ultra-Supercritical_Turk_Coal_Plant_Commences_Operations_, accessed 2013-3-17

- 79) 大容量石炭焚き火力発電設備の 高効率化に向けた技術開発 日立評論 2011.08, at

http://digital.hitachi.oron.com/pdf/2011/08/2011_08_02.pdf, accessed 2013-3-17

- 80) Aleksandr Shaulovich Leizerovich, Steam Turbines for Modern Fossil-Fuel Power Plants, The Fairmont Press, Inc., 2008

- 81) USC Steam Turbine technology for maximum efficiency and operational flexibility, at

<http://www.energy.siemens.com/nl/pool/hq/power-generation/power-plants/steam-power-plant-solutions/coal-fired-power-plants/USC-Steam-Turbine-technology.pdf>, accessed 2013-3-17

- 82) Fujimitsu MASUYAMA, History of Power Plants and Progress in Heat Resistant Steels ISIJ International, Vol. 41
(2001), No. 6, pp. 612-625

熱機関 (原子力発電 nuclear power unit)

- 83) A.M.ペトロシャンツ, ソ連の原子力開発のすべて, 世界最初の原子力発電所オブニンスク(1954年5月に臨界)の建設, 原子力産業会議, 1981, at http://www.rist.or.jp/atomica/data/dat_detail.php?Title_No=16-03-02-02, accessed 2013-3-17

- 84) Nuclear power plants and other large nuclear facilities in the United States, at

http://www.animatedsoftware.com/envirom/no_nukes/nukelist1.htm, accessed 2013-3-17

- 85) Plant Vogtle: The Beginning of a Nuclear Renaissance? Stephanie Lam March 21, 2012, at <http://large.stanford.edu/courses/2012/ph241/lam2/>, accessed 2013-3-17
- 86) IAEA Country Nuclear Power Profiles 2012 Edition, at http://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/CNPP2012_CD/countryprofiles/France/France.htm, accessed 2013-3-17
- 87) 桑野幸三、久野勝邦, 原子力タービン設計上の問題点, 日立評論, 昭和41年6月第48巻 第6号
at http://digital.hitachihyoron.com/pdf/1966/06/1966_06_14.pdf, accessed 2013-9-16
- 太陽光発電**
- 88) History: Photovoltaics Timeline 1960 to present, at http://inventors.about.com/od/timelines/a/Photovoltaics_2.htm, accessed 2013-3-17
- 89) The History of Solar - EERE - U.S. Department of Energy, at http://www1.eere.energy.gov/solar/pdfs/solar_timeline.pdf, accessed 2013-3-17
- 90) Air Force Switches on Largest Solar Power Plant, at <http://www.ens-newswire.com/ens/dec2007/2007-12-26-093.asp>, accessed 2013-3-17
- 91) Large-Scale Photovoltaic Power Plants, Ranking 1-50, at <http://www.pvresources.com/PVPowerPlants/Top50.aspx>, accessed 2013-3-17
- 92) Five largest photovoltaic power plant in the world, at <http://www.ecofriend.com/largest-solar-panel-array.html>, accessed 2013-3-17
- 93) France launches vast solar panel array, at <http://phys.org/news/2011-10-france-vast-solar-panel-array.html>, accessed 2013-3-17
- 94) Huge Photovoltaic Solar Plant Delivering over 200 MW of Power, at <http://cleantechnica.com/2012/07/20/huge-photovoltaic-solar-plant-delivering-over-200-mw-of-power/>, accessed 2013-3-17
- 95) Solar park to produce 13MW of power [March 20, 2013], at <http://gulfnews.com/business/general/solar-park-to-produce-13mw-of-power-1.1160819>, accessed 2013-3-17
- 96) First Solar To Build 2-GW Solar Facility in China [Sept 09, 2009], at <http://www.renewableenergyworld.com/rea/news/article/2009/09/first-solar-ordos-city-to-build-2-gw-solar-facility>, accessed 2013-3-17
- 97) 鯉沼秀臣「サハラソーラーブリーダー計画ー地球エネルギー新体系に向けた科学技術課題と国際貢献ー」, 学術の動向 2010年1月号, at <http://www.ssb-foundation.com/j-index.html>, accessed 2013-3-17

(2013年12月21日受理)

