

ビー玉エンジンをつくって熱と仕事を考える

飯田 洋治

e-mail yoji.iida@nifty.com

URL <http://homepage3.nifty.com/voiidea/>

“泰平のねむりをさます正（上）喜撰，たった四はいで夜も寝られず”

これは幕末，浦賀沖に蒸気船が現れたときの様子を風刺したものです。

これを契機に日本でも動力源としての熱機関が用いられるようになり，日本の近代化の大きな動力源になりました。

この講座では，ビー玉スターリングエンジンなど簡単な熱機関をつくり，熱機関の改良の歴史を振り返りながら，熱と仕事，効率，エントロピーについて考えます。

(図1)

(1) ヘロンの熱タービン

古代ギリシャに，熱を使って回転を取り出す装置を工夫していた人がいた。

<実験1> アルミ缶（お茶用）のタービン



(2) 力学的にももの温度を上げることがいかに大変かを実感する

ポット振り

<実験2> 10 分間，数人交替でポットの水を振り続ける。温度上昇は？

これを沸騰させるにはどれほどの時間振り続けられ
ばよいか？

振るだけで水を沸騰させるには大変な労力が必要

摩擦で湯沸かし

<実験3> 摩擦で湯沸かし(中部大岡島先生より)

摩擦で水を沸騰させるにも大変な労力が必要。「原始火起こし」

ジュールの実験 ポット振りと原理的には同じ実験

熱の仕事当量 $1\text{cal} = 4.2\text{J}$ (1cal: 水 1g の温度を 1 度上げるのに必要な熱量)

単位カロリーは 1 g 当り 単位ジュールは 1kg 当り



(図2)

★水 1kg を 1 度上げるに必要な熱は、その水を 430m 持ち上げる仕事に相当。

★常温 (20℃) の水 1kg が 100℃ になるまで加える熱量は、その水を 34km 持ち上げることに相当。

(図3)

$$4.2\text{J/gK} \times 1000\text{g} \times 80\text{K} = 1\text{kg} \times 9.8\text{m/s}^2 \times h$$

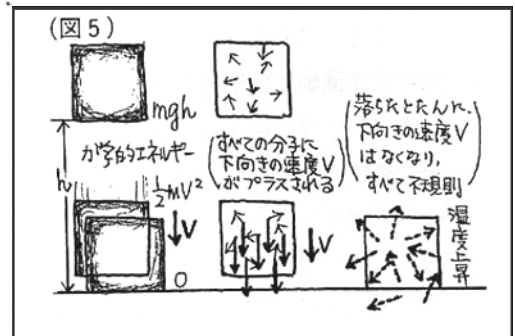
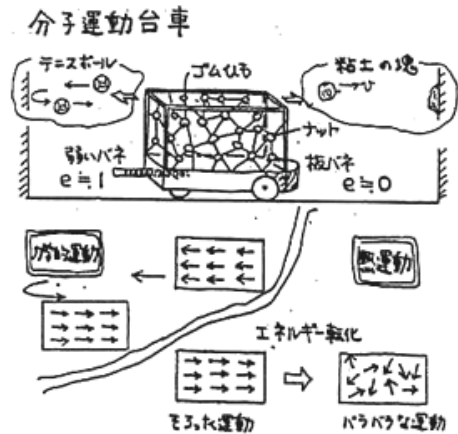
$$h = 34\text{km} \quad (\text{富士山 } 3.8\text{km} \text{ の高さの約 } 10 \text{ 倍})$$

★常温 (20℃) の水 1kg が 100℃ の水蒸気になるまでに加える熱量は、その水を 266 km の高さまで持ち上げる仕事に相当。水の蒸発熱 539cal/g

この水蒸気で同量の水を富士山まで持上げることができたら効率は 1.4% (ニューコメンの蒸気機関の効率に近いといわれる)

人力、馬力、水力などに頼るよりも、熱を使った方がはるかに楽だ。西洋では、効率の良い熱機関が開発されたおかげで産業革命に著しい拍車がかかった。

(2') ランダム運動台車で力学的運動と物体内部の分子の熱運動の違いを考える。



↑ (図4) ↓ (図5)

<実験4> 失われた力学的エネルギーの行く先は？

ボールのはね返り、粘土のはね返り、

はね返り係数の違い。

摩擦すること

(2'') 430m の高さから落とした水は落ちた瞬間力学的エネルギーを失う。

どうなったか。

分子の運動で考えてみよう。

(3) エアバイク/エアエンジン

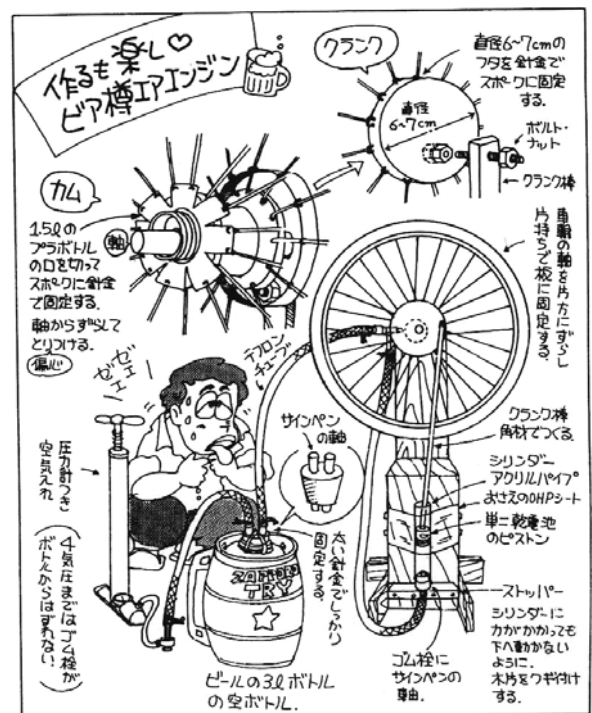
<実験5>

「仕事をする」ということはどういうことかを考える。熱を利用しない

「力が働いて、その方向へ動くこと」:

★仕事 $F \cdot s$ を生み出せばいい

★「くり返し」 往復運動



(4) 空き缶つぶし <実験6>

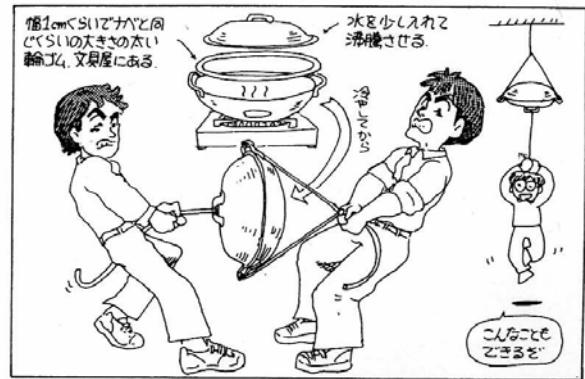
(図6)

科学館山田さんの演示実験

熱を使った大気圧機関 真空の利用

熱するだけでなく冷却の必要性

鍋で綱引き <実験7>



1660 ゲーリケ マグデブルグの半球

空気抜きポンプの開発。始め酒樽、次に銅の 容器を使って

パンクして失敗。強固な球状金属容器に

1690 パパンの大気圧機関 (図)

火薬の代わりに水蒸気に着目 シリンダーを外から直接熱し てから、冷やす。真空をつくって大気圧に仕事をさせる。

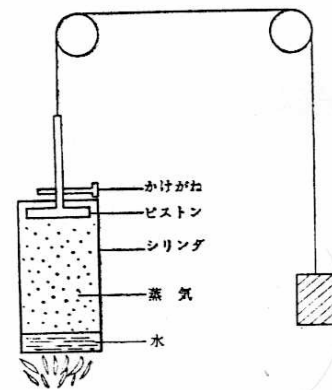


図 1-1 パパンの機関

(5) ニューコメン 直接冷却 大気圧の利用

1700 初めごろ鉱山 (地下 100m以上) のわき水の処理に困る。ポン プ動力として 500 頭以上の馬の使用。

1705 ニューコメンの大気圧機関 14 ストローク/min, 約 6 馬力 シ リンダーとボイラーの分離。シリンダーを外から水で 冷却

(図7)

1712 シリンダーに水を注入 バルブの自動操作

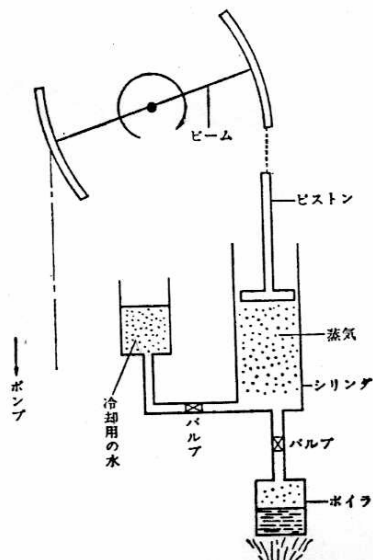
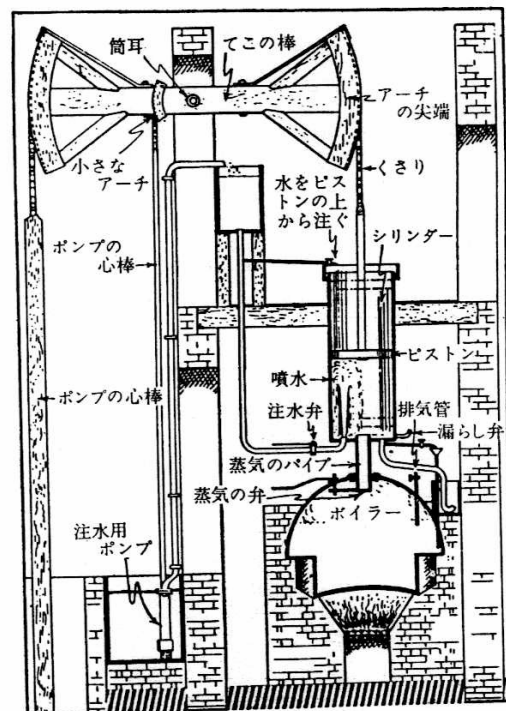


図 1-2 ニューコメンの大気圧機関

(図8)



6図 ニューコメンのポンプ用エンジン。

(図9)

この大気圧機関は、石炭消費量は大きかったが、およそ 60 年以上にわたってこの機関は活躍し、イギリス産業の基盤をつくった。

(6) ワットの蒸気機関 (図) 復水器(冷却部)の開発 間接冷却

エンジンを直接暖めたり冷やしたりするのはエネルギーの無駄が大きい
大気圧の利用から蒸気圧の利用へ

(図 10)

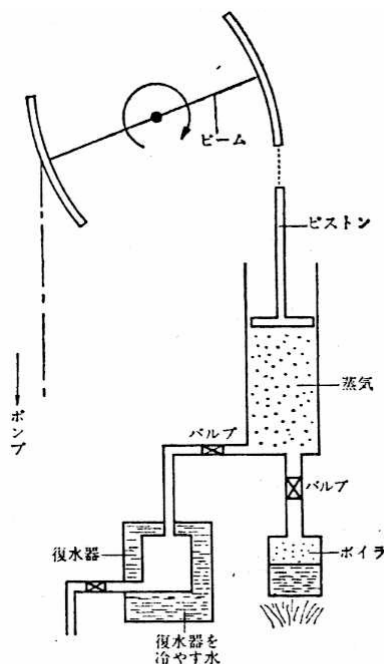


図 2-1 復水器のついた大気圧機関

(図 11)

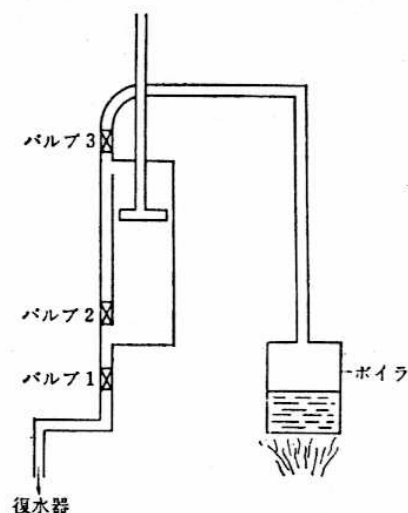


図 2-2 蒸気機関

1763 ニューコメンの大気圧機関の修理を頼まれる。

1765 復水器による大気圧機関

シリンダーの冷却が不要になった。

1769 蒸気機関 大気圧 (1 気圧) ではなく、蒸気圧を利用

ニューコメンのエネルギーの 25% 程度の燃料
これ以前はピストンの上下運動のみ

1780 ピカード 回転運動にクランクとはずみ車

1782 複動エンジン

1788 クランク式とは違った歯車式の開発

1794 ピカードの特許が切れクランク式に変更

1796 P-V インジケーター

描いたグラフの面積でエンジンがする仕事わかる

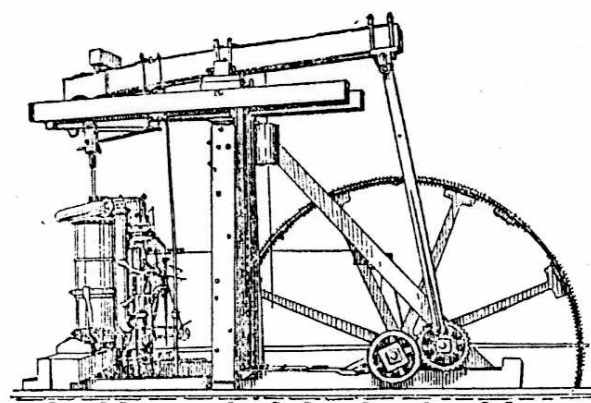


図 9 ウォットの蒸気機関

(図 12)

(図 13)

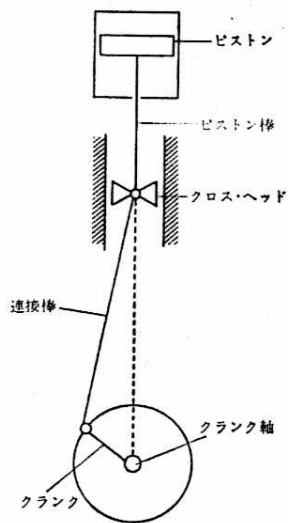


図 2-3 ピストン・クランクの運動

(図 14)

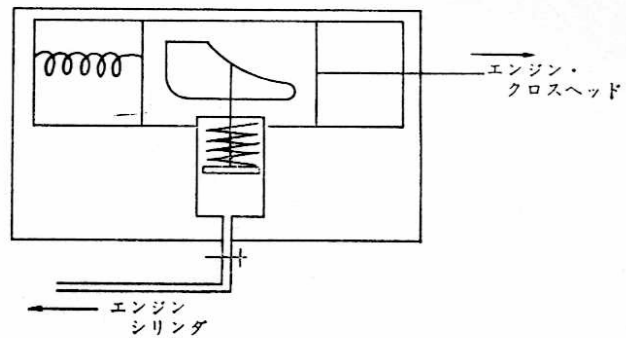


図 2-4 エンジン・インディケータ

(7) その後の蒸気機関の発展

1805 トレシビック 高圧蒸気機関 (2 気圧) 大量の冷却水が不要となった。

空中廃棄に道を開く。爆発事故が発生するようになる。

1807 フルトン 蒸気船

1814 スティーブソン 蒸気機関車

1816 スターリングエンジン

1827 スターリングの弟 加熱部冷却部の分離

1830 エリクソン スターリングエンジンの改良 (再生器)

1833 スターリングエンジン 大型になり船沈没。その後忘れ去られた。

1852 ケルビン カルノーのエンジンを逆運転すればヒートポンプ、冷凍ができることを示唆

1860 ルノアール ガスを燃料とした内燃機関

1861 オットー 4 サイクルガソリンエンジン 自動車の発達

初期内燃機関は低温部温度が高く大量の冷却水が必要であったが、圧縮比を上げることで環境温度に近い低温をつくることができるようになり、無駄に熱を流さず、空冷でも使える内燃機関が実現。

1882 ラバルノズル 衝撃蒸気タービン 大出力

1893 ディーゼルエンジン

1902 モス ガスタービン

<20 世紀 自動車, 航空機が活躍>

1919 ゴダード ロケットエンジン

1940 イタリア カプロニ社 ジェットエンジン

(8) 効率が悪すぎた。最大の効率のものを考えよう

効率最大の熱機関は カルノーの原理 熱力学第二法則 理論

最大効率は温度差だけで表される。

吸熱廃熱部の温度差が大きいほど効率は大きい。

廃熱部の温度が低いほど効率が大きい。

熱を有効に使う 熱効率

ここに、コップ1杯の湯がある。放置すれば湯はただ冷めるだけで何も仕事をする事はできない。すべて無駄になってしまう。しかし、この冷めるまでの熱(80℃→20℃)をすべて無駄なく使って、コップ1杯の水(200g)を一方向に飛ばすとしたら、どれだけの速さになるだろう。計算をすると、710m/sの速さ(音速の2倍以上)にもなる。1tの自動車なら36km/hの速さで走らせることができる。このことから、熱を有効に使えば大変大きなエネルギーが得られることがわかる。

【質問1】 乗用車はガソリンを燃焼させて走る。このうち有効な仕事に使われる熱は与えた熱の何%(熱効率という)ぐらいだろうか。

予想 (ア) 10%以下

(イ) 25%程度

(ウ) 50%程度

(エ) 75%程度

(オ) 90%以上

現在のガソリンエンジンの熱効率は25%程度といわれる。驚くほど効率が悪い。使用ガソリンの3/4が無駄になってしまう。実にもったいない話だ。初めて実用的な熱機関として登場したニューコメンの熱機関の効率は1.5%程度であったというから、なんと98.5%もの熱が無駄になってしまっていた。蒸気機関の開発改良で有名なワットの蒸気機関でさえ効率は6%程度であったという。誰しも、なんとかエネルギーの無駄遣いを無くしたいと思う。その後、現在に至るまでの200年間、さまざまな熱機関が開発されてきたが、依然として効率は大変悪い。

蒸気機関車 10%以下

ガソリンエンジン 25%程度

ディーゼルエンジン 30%程度

火力タービン 最大40%程度

【質問2】 どうしてこんなに効率が悪いのだろうか。次の意見のうちどれが正しいと思うか。

(ア) 現在の技術水準が低いから効率が悪いだけで、技術水準を上げればはいくらでも効率をあげることができる。

(イ) いくら技術水準を上げてても効率100%の熱機関は理論的に作ることができない。

S. カルノーはどこをどうすれば無駄な熱を防ぐことができるのか、最も効率のいい熱機関を作るにはどうしたらいいのか思いをめぐらせた。そして理論的に効率100%の熱機関を作ることは不可能だという結論に達した(1824年)。彼の考えのポイントは次のようにまとめられる(2)。

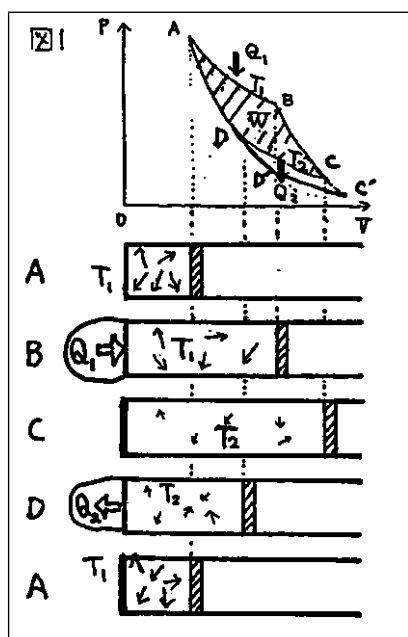
(1) 熱によって仕事ができるのは、ものの体積が変化する(ΔV)からである。体積が変化するには温度差がなくてはならない。いくら高温であっても温度差がなければ体積の変化は生じない。どうしても低温が必要である。温度差があることが外部に仕事をとりだすための条件である。

(2) しかし、いくら温度差があっても、コップの湯が冷めるようなとき、何も仕事を取り出すことはできない($\Delta V=0$)。熱は拡散し、すべて無駄になってしまう。温度差があるかぎりこのような熱拡散—これは不可逆現象である—は避けられない。逆に温度差がなければ(熱平衡状態)熱は逃げないが、何も仕事をとりだせない。熱機関に摩擦がある場合などを含めて不可逆現象をとらなければ必ず熱は無駄になる。

(3) カルノーは最大効率をうるためには、不可逆現象をとらぬ理想的な条件で、①温度差があるときは熱の出入りを絶つ(断熱変化)か、②温度差を作らないように体積変化(等温変化)をさせる以外に無駄をなくすことはできないということに気づいた。つまり、等温変化と断熱変化だけで可逆な熱機関を作れば、無駄な熱は生じない。こうすれば最大効率を得られるはずだというのである。

(4) そこで考えられたものが理想気体を作業物質としたカルノーの可逆サイクルであった。 p - V グラフをかくと図1のようになる。

カルノーサイクルにおいて、気体が膨張して外部に仕事をして、膨らんだ体積を元に戻さなければ熱機関を連続的に運転することはできない。体積を元に戻そうとするとどうしても、外から気体に仕事をして熱を外に捨てなければならぬ。膨らんだ体積が自動的に元に戻ってくれないのである。つまりここには、いくら理想的な可逆熱機関であっても、「膨らんだ体積は自動的に元には戻らない」という不可逆性—熱力学第二法則—が横たわっていたのである。少なくともこの戻しの過程が存在する限り、熱を外に捨てねばならず、効率100%の熱機関をつくることは不可能である。ただ、効率を上げることはできる。熱の捨て場所の温度が低いほど効率が上がる(図1のC'D')。なぜなら低温ほど作業物質である気体分子の熱運動が不活発になり、少ない仕事(捨てる熱が少ない)で、気体を元に戻しやすくなるからである。



らである。

←(図15)

- (i) A→Bの過程 等温膨張(高温部 T_1 で熱 Q_1 を吸収)
- (ii) B→Cの過程 断熱膨張
- (iii) C→Dの過程 等温圧縮(低温部 T_2 に熱 Q_2 を放出)
- (iv) D→Aの過程 断熱圧縮

このカルノーサイクルからわかること。

① すべて、等温過程、断熱過程であるので、熱拡散がない

(不可逆性がない可逆機関)。最大効率を得ら

れる ② 低温部へ熱 Q_2 を捨てないことにはサイクル(連続運転)ができない。

③ 低温部の温度を下げればグラフはC'D'となり、斜線部の面積(外部にする仕事)が大きくなり、効率が増すことがわかる。

④ 最大効率は温度差だけで表わされる。(3)

$$e = \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1} = \frac{T_1 - T_2}{T_1}$$

- ⑤ 低温部 $T_2 = 0 \text{ K}$ にならない限り効率100%は実現しない。
- ⑥ 高温部の温度 T_1 が高いほど、低温部の温度 T_2 が低いほど効率がよくなる。低温部の温度が低いほど捨てる熱は少なくてよい。なぜなら作業気体である分子の熱運動が不活発になるので、これに逆らって外部からする仕事は小さくてよい。楽にピストンが戻せる。
- ⑦ 膨張した気体は何もせずに元の体積に戻ることができれば、熱を捨てることも低熱源も不要で効率100%が実現する。そんなことはありえない。熱力学第二法則。

【問題】 効率33%，100万kWの発電所がある。外部に捨てるエネルギーはどれだけか。
水1kgで $2.0 \times 10^4 \text{ J}$ の熱を吸収するものとする。毎秒何トンの冷却水が必要となるか。

$$200 \times 10^4 \times 10^3 \text{ J/s} = 2.0 \times 10^4 \text{ J/kg} \times m \quad m = 100 \times 10^3 \text{ kg/s} = 100 \text{ t/s}$$

このように、捨てる熱は発電量より数倍も多い。とくに発電量の大きな火力発電所、原子力発電所で大量の熱を捨てる。これだけのエネルギーを捨てる低熱源は海水しか考えることができない。発電所近くの温排水の問題は大きな問題となっている。



火力発電所からの温排水の赤外線写真。
白い部分 陸地
黒い部分 海
白い尾を引いたところ

(図16)

- (8) 冷却部が必要なこと 火力発電所や原子力発電所が海岸端にある理由
効率 33%，100 万 kW の発電所では 200 万 kW 分を
海に捨てる（大量の冷却水が必要）

水冷式 自動車の場合

空冷式 断熱膨張で圧縮比改良されて空冷が可能になった

初期内燃機関は低温部温度が高く大量の冷却水が必要であったが、圧縮比を上げることで環境温度に近い低温をつくることができるようになり、無駄に熱を流さず、空冷でも使える内燃機関が実現。

- (9) ビー玉スターリングエンジンをつくろう

＜実験7＞ ビー玉スターリングエンジンはオランダで開かれたスターリング機器国際会議に出品されたという。（土田三郎）

ブックスタンドに、W クリップでフレキシブルな試験管支えの支柱を立て、W クリップでフレキシブルな燃料台をセットする。写真

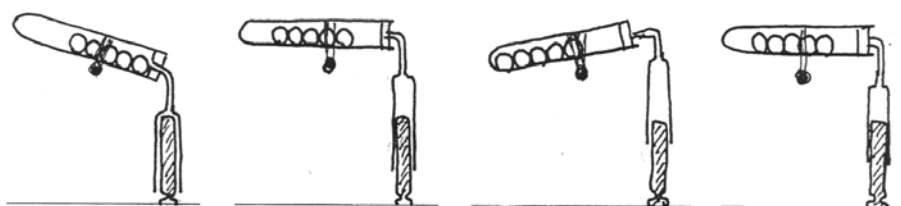
現物を見るだけで、自分で動くように組み立てる。
動くようになったら、どうして動き続けるかその仕組みを考え、議論し、お互いに説明し合ってみよう。



ビー玉スターリングエンジン材料一式

- (1)試験管 1, (2)ゴム栓 1, (3)ビー玉 5, (4)銅パイプ 5cm, (5)シリコンチューブ 5cm, (6)注射器 5ml, 1,
 (7)大目玉クリップ 1, (8)ブックスタンド 1, (9)ベニア板 12*100*250, 1, (10)ネジ M6×50, 1, (11)Wクリップ 2,
 (12)支柱角材(穴2つ空き)3*25*130, 2, (13)固形燃料 1, (14)固形燃料台支え角材 15*40*70, 1
 (15)固形燃料台支え角材(釘穴あり)5*25*90, 1 と釘 2 本 (16)固形燃料カバー用アルミケース 2,
 (17)ライター (18)スポンジ, セロテープ, 両面テープ少々

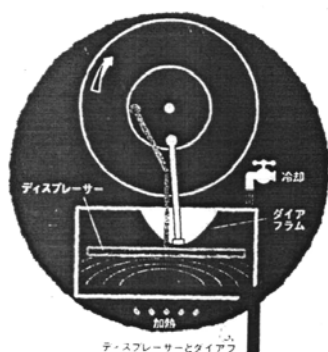
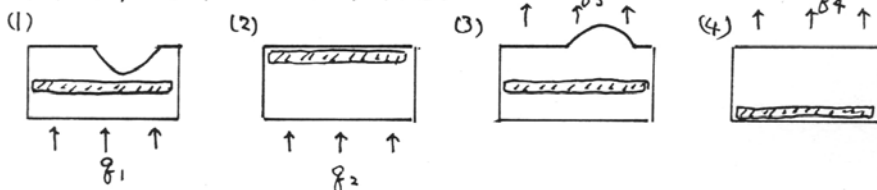
(図 17)



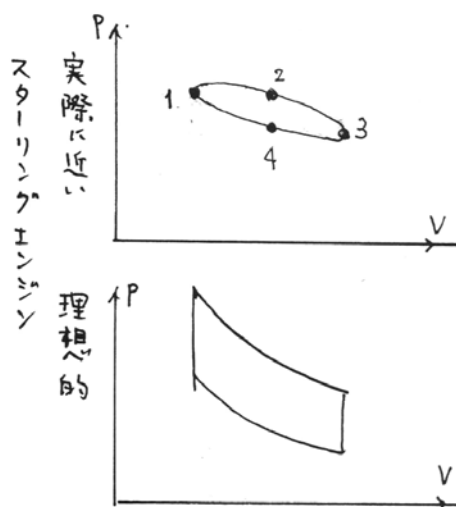
学研『手のひらエンジン』
 (位相差なし)



ダイヤモンドとティスフレーター位相差90°



ディスプレイサーとダイヤフラム・ピストンは、位相差90°を保ちながら上下するようになっている。位相差とは、タイミングのずれ。ディスプレイサーは空気を上下に入れ替える働きをする。



(10) 別タイプのスターリングエンジン

<実験8>

- ①学研「手のひらエンジン」
- ②上下動式スターリングエンジン
- ③中部大学から借りた大型スターリングエンジン

(11) ゴムエンジン

<実験9>

(12) 形状記憶合金エンジン

<実験10>

(13) 水飲み鳥

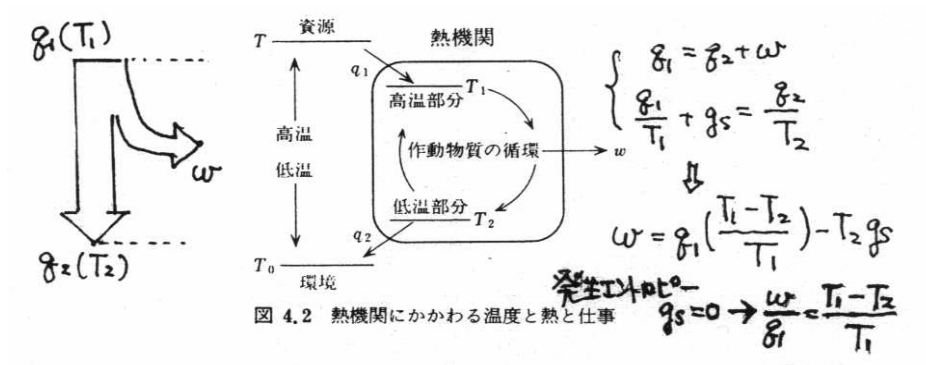
<実験11>

どうしていつまでも水を飲み続けるか？その理由を考えよう。

低熱源の必要なこと。

(14) エントロピーでエネルギーの無駄を考える

(図 18)



参考図書図版

- (図1, 9) ジョン・F・サンドフォート『熱機関』河出書房新社
- (図2, 5, 6) 『いきいき物理わくわく実験 1, 2』日本評論社
- (図7, 8, 10, 11, 13, 14) 井田幸次郎『やさしい熱力学』東京図書
- (図12) ダイネマン『大自然科学史 6』三省堂
- (図16) 小野周『温度とは何か』岩波書店
- (図18) 槌田敦『熱学外論』