

「機械製作実習 スターリングエンジン」のテキスト

Education Q: A Textbooklet for "Exercise for Machine Shop Practice - Stirling Engine"

牧野 俊郎 (京都大学)

Toshiro MAKINO (Kyoto University)

私どもの大学の工学部(学部課程)は6つの学科からなる。その1つが学年定員235名の物理工学科である。学生は3年進級時に4つのコース(学科目)のいずれかに進級する。そのコースの1つが定員105名の機械システム学コースである。そのコースに進級直後の3年生に課す実験・実習科目の1つに「機械製作実習」という半期(1 Semester)1単位の科目がある。学内の実習工場で旋盤・フライス盤などを用いて、曲がりなりにも機能をもつ1つのミニ機械を自分の手でつくる体験をさせる科目である。

2年前までは、小型バイスを製作させてきた。これは、私が学生の時から不動の、“伝統の課題”であったが、昨年、それを標記の“スターリングエンジン”に置き換えた。この課題は、全国の大学あるいはむしろ高専でポピュラーなものであったと聞く。ともあれ、私どもは、遅れて、この課題を実習教育の課題に選んだ。

ついでに、学生を実習工場に送る前に、「安全工学」に加えて、「工作機械」と「熱力学」のおさらいくらいの座学は必要である。かくして、「熱力学」の担当者が100分くらいのスターリングエンジンの講義をすることになった。次以降のページに示すのは、その講義のために準備したテキストのコピーである。ふだんの2年生への「熱力学」講義のテキストのときとは違って、より学生に近づいて書いたつもりである。教室の理想的な「熱力学」と実習工場で作る現物との距離を考えて、あるいは、自分がこれまでよく解らなかったあたりについては、くどく書いた。いろんなご批判・ご指摘をいただければありがたい。あて先は、

e-mail: toshiro.makino.52s@st.kyoto-u.ac.jp

さて、その講義であるが、テキストの内容に入る前に、できあがったスターリングエンジンを運転して見せ、さらに、1つの実験をやって見せることにしている。教室に、2L ビーカーに入れた液体窒素を準備し、その中に膨らませた風船を漬けて縮ませ、その縮んで100K くらいになった風船を300K の熱浴(そのあたり)にさらし、風船が見る間に大きくなるようすを見せる。

その後、おまけで、残った液体窒素を教室の床にまき散らす。学生はワーッと叫んでよろこぶ。

この実験を見せる趣旨は、講義の雰囲気づくりのこともあるが、その主たる部分は、“気体を加熱するとその体積が増す”という熱力学の基本を実感させる、というところにある。その基本は、学生の誰もが知っていることであるが、それを実感として身につけている者は実は少なく、中学か高校の理科の先生がそうだと聞いたから、知識として知っているという者が大部分であるようである。もしそうであるとする、それは次の世代の人たちにとって危険である。これが、この実験を加えた意図である。

いっぽう、この風船の実験を通じて、教える側の私自身が気づかせられたことがある。私は、それまで、気体の圧力 p が増すと、その体積 V は減るか変わらないかのいずれかであり、 p が増加して V も増加するという現象は、ふつうには起こらないと思っていた。インジケーターが描くエンジンのサイクル図の角が丸いこと(私の理解に照らしての矛盾)については、燃焼にともなう物質質量(mol 数)の変化や燃焼ガスの空間的な非均質さに起因するのであろうなどと、いい加減に考えていた。上述の簡単な実験では、しかし、その起こらないはずの現象が、いとも簡単にそのあたりで起ってしまった。(風船内の気体の)温度が上がると、(風船内の気体の)体積は増加し、(風船の張力が増加して風船内の気体の)圧力が増加する。これは、圧力 p と体積 V がともに増加するという、教科書の理論サイクルの pV 図には見られない熱力学変化である。この「熱力学」の担当者は、ここで、自分で教えられてしまった。

なお、このテキストを書いた時点で、後ろめたく思っていることがある。それは pV 図と pV 図、 Ts 図と TS 図を、きちんと説明することなく、その都度その場の都合に応じて使い分けていることである。次年度版のテキストでは、なんとかしたい。

機械製作実習 スターリングエンジン － 熱力学からの Introduction －

Makinotosh iro040413

0. はじめに

“機械製作実習”では、実際に形になって動く“もの”をつくることを体験してほしい。“もの”ができることを頭で理解することと、自分の手で作った“もの”を動かせることとの間には、テレビのお料理番組を見るのと、ネタの仕入れから始めて自分で作った料理を味わうのとの違いくらいのもがある。教室で学んだ“熱力学”がきょうの自分の作業につながるあたりを頭と体で納得するのは、実に楽しい。スターリング(Stirling)エンジンは、そのような目的のための実習の課題としてのすぐれものである。

この講義では、これからつくる“もの”が熱力学的にはどのように説明されるかを考え始められるように Introduction する。はじめにお断りするが、“熱力学”講義の理想的なエンジンと実習で作る実際のエンジンとの間には(とくに Stirling エンジンの場合)かなりの距離がある。どこがどれだけ違うのかを考えながら実習に当たると、こんどは“熱力学”を見直したくなるかもしれない。

1. “熱力学”のおさらい

1.1 機械工学における機関(エンジン)

機械工学は、熱エネルギーから力学的なエネルギーを得て自動車や航空機を動かし、あるいは、その力学的なエネルギーからさらに電気のエネルギーを得て、現代の生活・生産の基礎を作り出してきた。これらのエネルギー変換の装置・からくり・機械が機関(エンジン, engine)であり、その動作原理は熱力学によって説明される。日常語のエンジンは、多くの場合、自動車や航空機のエンジンを指すが、機械工学でいう機関には火力発電所・原子力発電所などの大型・設地型のエンジンも含まれる。

1.2 熱力学状態変化

いま、高温高压の状態 **1**にある流体を膨張させて、比較的低温低压の状態 **2**に至らせる(図 1)。こ

のとき、流体は外部に仕事をする。逆に、低温低压の状態 **1'**にある流体を圧縮して、比較的高温高压の状態 **2'**に至らせる(図 1)。このとき、流体は外部から仕事をされる。これらの状態変化の過程では、熱エネルギーと力学的なエネルギーの変換(energy conversion)が行われる。

1.3 熱力学サイクル

図 1 におけるようなエネルギー変換過程は、しかし、単発的なものであり、連続的に自動車を動かしあるいは連続的に電力を供給できるたぐいのものではない。(熱エネルギー → 力学的エネルギー)の変換を連続的に行うためには、図 2 に示すような熱力学サイクルを実現する装置を準備することが必要である。熱力学サイクルは、流体がその熱力学的な状態を変化させてもとの状態にもどることを繰り返させて、エネルギー変換を継続させるものである。

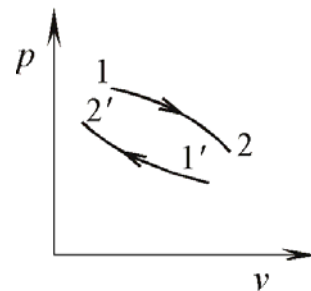


図 1. 作動流体の膨張と圧縮

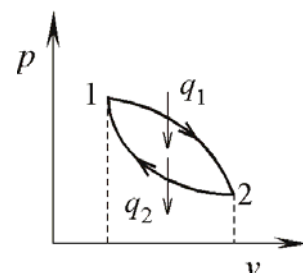


図 2. 熱力学のサイクル

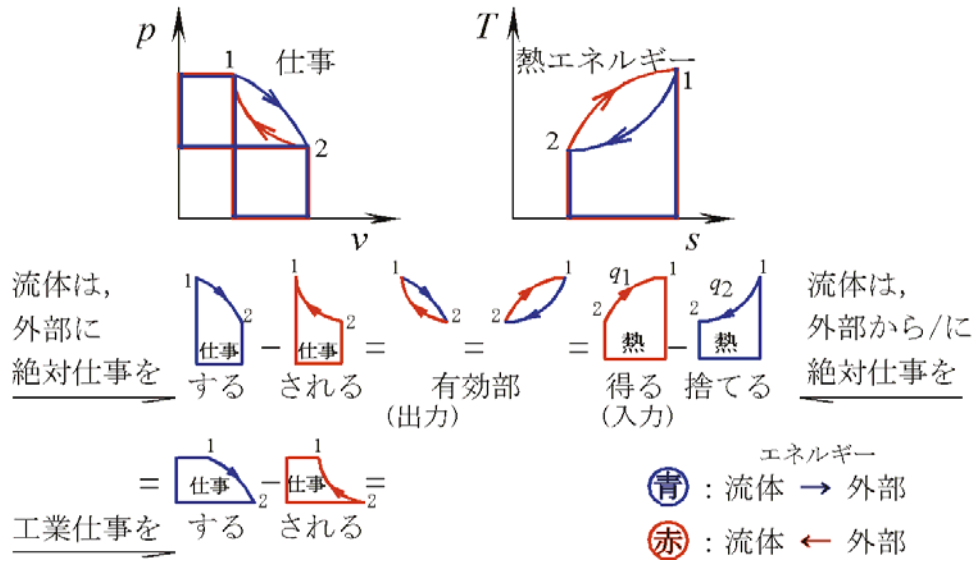


図 3. 熱力学サイクルにおける熱エネルギーと仕事の収支

1.4 サイクルにおけるエネルギー変換

熱力学サイクルにおける熱エネルギーと力学的エネルギーのやりとりは、 $p-v$ 図と $T-s$ 図に表される。図 3 は、そのやりとりを図示するものである。絶対仕事や工業仕事(単位: J/kg)は $p-v$ 図上の面積で表され、熱エネルギー(単位: J/kg)は $T-s$ 図上の面積で表される。その仕事と熱エネルギーの収支(有効部)はたがいに等しい。ここで、仕事を考えるときには、

流体が外部に(絶対仕事/工業仕事)をする
 外部が流体に(絶対仕事/工業仕事)をする

流体が外部から(絶対仕事/工業仕事)をされる
 外部が流体から(絶対仕事/工業仕事)をされる
 の、主語と目的語、能動態と受動態、絶対仕事と工業仕事を注意深く使い分けることが重要である。いっぽう、サイクルについて仕事の有効部を考えるとときには、絶対仕事をもとにして考えても工業仕事をもとにして考えても結果は同じになるので、あいまいに“仕事”と呼んでも誤解を生むことはない。

1.5 工業熱力学のサイクル

もっとも基礎的な熱力学のサイクルとしては、

表 1 工業熱力学のサイクル *

	(閉鎖系) 密閉/容積型 往復(reciprocal)運動 ... 小規模も、可動型も	(開放系) 定常流動系 回転(rotary)運動 ... 大規模エネルギーも、設地型も
内燃機関 ... エネルギー源: 高級燃料 作動流体:	Otto/ Diesel サイクル ... のりもの 燃焼ガス	Brayton サイクル ... 航空機・火力発電 燃焼ガス
外燃機関 ... エネルギー源: なんでもあり 作動流体:	Stirling サイクル ... エネルギー・環境? 空気	Rankine サイクル ... 火力/ 原子力発電 H_2O

(*: この表は、サイクルのポピュラーな機構・用途を示すものであり、サイクルを厳密に分類するものではない)

Carnot サイクルが挙げられる。しかし、実際の人間の生活・生産活動を支えるサイクルとしては、表 1 に示すものがより重要である。そのなかで、Stirling サイクルは、他のサイクルに匹敵する歴史をもつが、いまだ、Otto サイクルや Rankine サイクルに並ぶものにはなっていない。Stirling サイクルは、密閉/容積型の外燃機関(external combustion engine)のサイクルである。外燃機関では、熱エネルギーが作動流体の(内からではなく)外から供給される。外燃の“燃”は、字義的には燃焼を意味するが、より広くは熱エネルギー源の意味であり、このような機関では、たとえば太陽エネルギーの利用も考えられる。ごみ処理工場の発生する熱エネルギーを利用するなど、安価で環境に配慮する燃料を選ぶことも可能である。手に持てるくらいに小規模で可動型のもも可能である。Stirling サイクルは、今後ともに期待されるサイクルである。

1.6 身近な機関(エンジン)

Stirling エンジンを説明するまえに、身近な自動車のエンジン(内燃機関)のしくみとその理論サイクル(Otto サイクル)について確認する。図 4 は、小型自動車に用いられる 4 行程のガソリン火花点火機関のしくみを表すものである。ここでは、エネルギー源は作動流体のなかにある。<燃料と空気の予混合気をシリンダー内に吸気し(a→b)>、<圧縮して(b→c)>、<火花点火・燃焼させて(c→d) 燃焼ガスを膨張させ(d→e)>、<シリンダー外に排気する(f→g)> という 4 行程(ピストンの 2 往復/クランクシャフトの 2 回転)を繰り返す。ここで、気づいてほしいのは、エンジンが積極的にピストンを駆動する力を発揮するのは、4 行程の内の 1 行程(膨張過程)においてだけであり、他の 3 行程では、ピストンは はずみ車の慣性力に依って従動的に動くことである。言い換えると、自動車は、スターターがないと動き出さない(同様に、これから作る Stirling エンジンも、手ではずみをつけてやらないと動き出さない)。図 5 に、Otto サイクルの $p-v$ 図と $T-s$ 図を示す。ここでは、図 4 の吸気・排気部が省略され、曲線が理想化され、燃焼による物質質量(mol 数)の変化もないとして、あたかも一定量の作動流体が密閉系のなかで同一のサイクルの過程を繰り返すかのように(ゴマかして)表現されている。

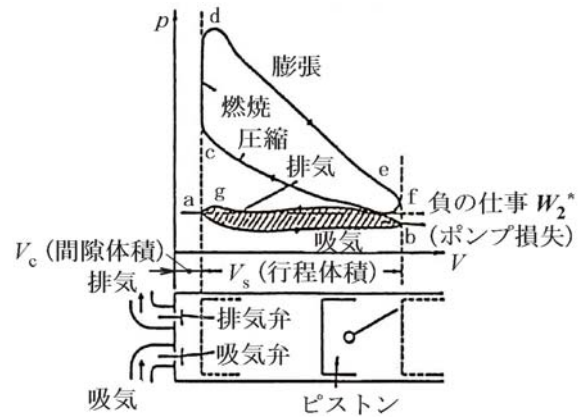


図 4.4 行程ガソリン火花点火機関

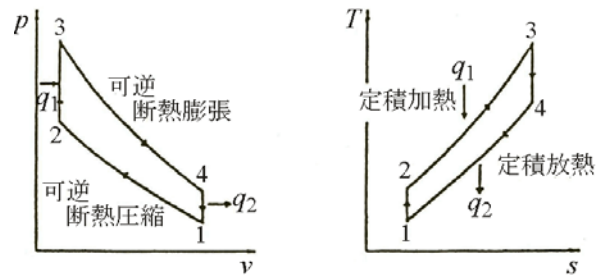


図 5. Otto サイクル ($p-v$ 図と $T-s$ 図)

2. Stirling エンジン

2.1 往復運動する密閉型の外燃機関

§ 1.5 の表 1 に見たように、Stirling エンジンは、基本的に、往復運動する密閉型の外燃機関である。§ 1.6 に見たガソリンエンジンと比較すると、“往復運動する密閉型の”までは同じであるが、ガソリンエンジンの場合のようにゴマカシの“密閉型”ではなく、Stirling エンジンは厳密に“密閉型”であるのがふつうである。往復運動する外燃機関を実現するには、原理的には図 6 に示すような機構が実現できればよい。シリンダー内の気体は、暖められると膨張し、冷やされると収縮する。ピストンは往復運動する。この図はわかりやすいが、しかし、このままでは、高温熱浴と低温熱浴を 1 サイクルあたりに 2 回交換しなければならないので現実的ではない。

2.2 ディスプレーサー

図 6 における高温熱浴と低温熱浴の交換作業をうまく行う工夫として、流体室内に加熱部(heater)と放熱部(cooler)を設け、その間を動く可動式の

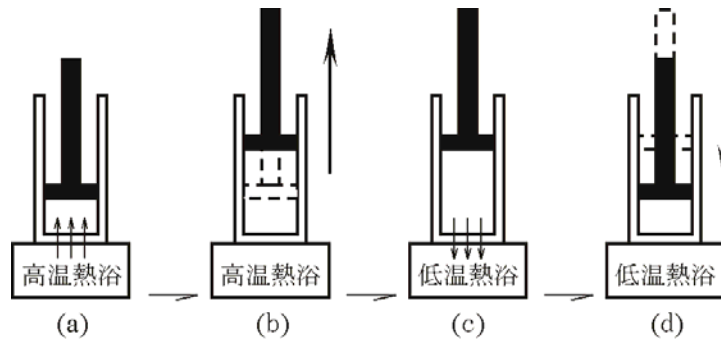


図 6. 密閉型外燃機関の考え方 [3]

物体としてディスプレイサー(displacer, DP)を置く方法が考えられる. 図7で, 加熱部では気体が加熱される. 放熱部には放熱フィンなどが設けられ気体の冷却が促進される. ディスプレーサーとシリンダーの間にはすきまがあって, 気体はそのすきまを行き来する. この行き来は素早く起こり, 気体の温度は, 流体室の全域にわたって一様になるように変化する. 流体室にある気体の全体の体積 V は, パワーピストン(power piston, PP)の位置によって決まり, ディスプレーサーの位置にはよらない. ディスプレーサーは, 加熱部にある気体と放熱部にある気体の割合を制御する. ディスプレーサーの位置に応じて, 気体は, おもに状態 $1' \rightarrow 3'$ の過程で加熱され, 状態 $3' \rightarrow 1'$ の過程で冷却される. ディスプレーサーの動作のタイミングは構造的に自動化できる. すなわち, ディスプレーサーとパワーピストンの往復運動を, 連結棒(connecting rod)を介してはずみ車(flywheel)つきの

共通の回転軸の運動に変換するとき, その回転運動の位相を, ディスプレーサーの位相の方が 90° だけ先行するように設定する. このディスプレイサーは力の発生には直接に寄与しない. その動きは, パワーピストンの動力とはずみ車の慣性力に従動する. いったん上り切った/下り切ったディスプレイサーやパワーピストンが, こんどは下向き/上向きに運動を始めるのは, その慣性力による.

2.3 再生器つきの Stirling エンジン

図 8 は, さらに再生器(regenerator)を備えた Stirling エンジン の構造を表すものである. この図のエンジンの場合には, ディスプレーサーとシリンダーの間に気体が行き来するすきまはない. 気体は, 図の左側の迂回路を通してディスプレイサーの上部(加熱部)と下部(放熱部)の間を行き来する. 迂回路には再生器が設けられている. 再生器

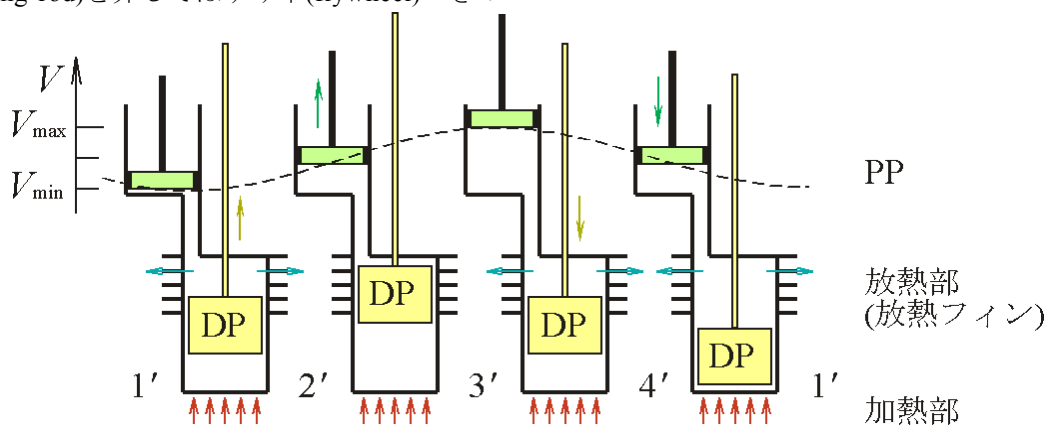


図 7. ディスプレーサーつきの外燃機関

は熱容量の大きい金網などの気体透過性の固体層であり、その層のなかには大きい温度勾配が生じる。すなわち、この再生器付きのエンジンの場合、エンジン内の気体は、理想的には、再生器の層を境にして、温度がほぼ一様に T_H である高温の気体と、温度がほぼ一様に T_L である低温の気体に二分される。その層の加熱部側の温度は加熱部の気体の温度 T_H に近く、放熱部側の温度は放熱部の気体の温度 T_L に近い。ディスプレイサーが上に進んで、気体が加熱部から放熱部に流れるとき、再生器を通る気体は、温度差($T_H - T_L$)に相当する熱エネルギーをこの再生器に残して(蓄熱して)冷やされる。逆に、ディスプレイサーが下に進んで、気体が放熱部から加熱部に流れるとき、再生器を通る気体は、温度差($T_H - T_L$)に相当する熱エネルギーをこの再生器から得て(再生加熱されて)暖められる。まとめていうと、再生器は、気体の冷却過程で放出すべき熱エネルギーの一部をいったんそこに蓄え、追って(2過程分の時間(180°分の位相)を経て)その熱エネルギーを気体の加熱に用いる蓄熱器(heat storage)・熱交換器(heat exchanger)として機能する。その結果、再生器を用いるエンジンでは、エンジンを動作させるのに必要な、気体への熱エネルギーの出入りの分の一部を、作動流体の内部での熱エネルギーのやりとりで賄うことができる。すなわち、再生器付きのエンジンの熱効率が高い。ところで、図7のエンジンでは、気体の p, v, T

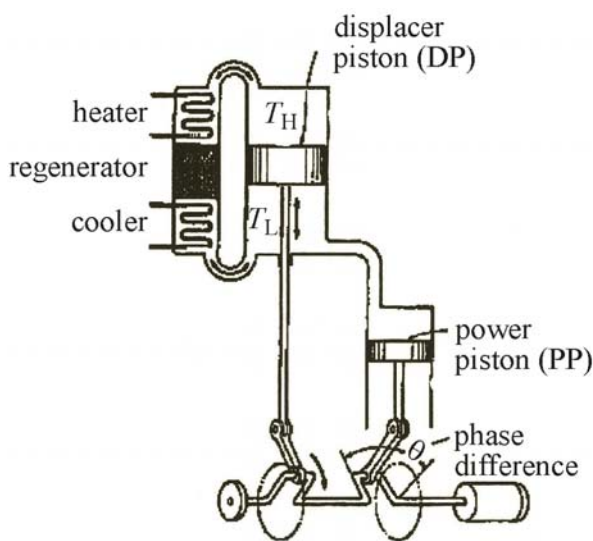


図8. 再生器付きの Stirling エンジン [3]

はエンジンの内部で一様であると見なせるものであったが、図8の再生器付きのものの場合、圧力 p は流体室の全域で一様であるとしても、温度 T や比体積 v (あるいは質量密度 ρ) は再生器の両側でたがいに大きく異なる。そのため、図8のエンジンについて、無理やり1つずつの pv 図や Ts 図を描くときには、 T や v は、気体の混合平均された温度や比体積であるとして扱う。このときには、気体の質量を m として、 $v=V/m$ である。しかし、この‘無理やり’は実に乱暴なやり口であるので、図8を見せられて、次に(T や v についての断りもなく)、これがそのサイクルの pv 図や Ts 図であるという図を見せられても、それで納得できない。については、‘そういう’ものである一教科書は ときに不親切である—と 思って §2.4 に進んでほしい。

2.4 熱力学の理論 Stirling サイクル

熱力学の教科書には、Stirling サイクルの理論サイクルとして図9に示すようなものが示される。このサイクルは、定積加熱(1→2)、定温膨張(2→3)、定積冷却(3→4)、定温冷却(4→1)の4過程からなる。§2.3 に示したような、なにかのすぐれた熱交換手法を用いて、定積冷却過程で放出される熱エネルギーのすべてを定積加熱過程における加熱に利用することができれば、この両定積過程における熱エネルギーの収支は相殺され、このサイクルの熱効率は Carnot サイクルの熱効率に等しくなる。すなわち、サイクルの最高温度と最低温度が指定される場合には、Stirling サイクルは Carnot サイクルと同一の最高の熱効率を実現する。ただし、この理論サイクルにおける定温過程や定積過程を直接的かつわかりやすく実現する外燃機関の実機

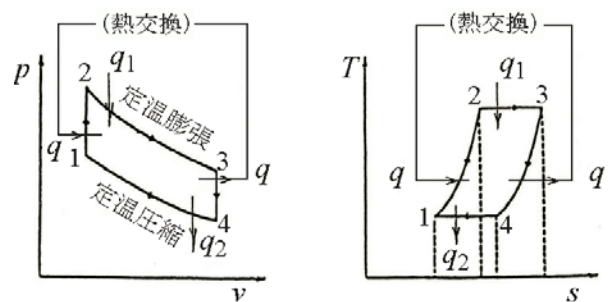


図9. 熱力学の Stirling サイクル (pv 図と Ts 図)

が想定されてきたわけではない。この意味で、図 9 のサイクルは多分に理想的・非現実的なものである。図 8 のエンジンは、現実的なもののなかでは比較的 図 9 に表すものに近いサイクルをとるが、定温・定積・混合平均などに関して、その間にはかなりの距離がある。

2.5 熱力学の理想：定温過程

理論上のことがらとして、Carnot サイクルや Stirling サイクルは、サイクルの最高温度と最低温度が指定される場合に(限り)最高の熱効率を実現するサイクルである。それは、これらのサイクルが定温過程(温度が一定の変化過程)を含み、その過程は熱エネルギーと力学的なエネルギーの変換を最高度を実現するからである。Note 1 は、このことを、状態 1 から状態 2 への定温膨張過程について説明する。この過程で、流体は加熱されるが、流体の温度は上がらない。流体の相変化がないの

に加熱しても温度が上がらないのは、いっけん不思議なことであるが、非現実的なことではない(cf. § 3.2)。逆にいうと、流体に熱エネルギーを加えることなく(断熱)膨張させると、流体の温度は下がるが、流体に適切な熱エネルギーを加えながら膨張させれば、定温膨張過程は実現できる。定温膨張過程で、流体は、その比内部エネルギーのうちの Helmholtz の比自由エネルギーの減少分 (f_1-f_2) をすべて絶対仕事 W_{12} [J/kg] に変換する。その比エンタルピーのうちの Gibbs の比自由エネルギーの減少分 (g_1-g_2) をすべて工業仕事 W_{t12} [J/kg] に変換する。外部から流体に加えらる熱エネルギー q_{12} [J/kg] は、すべて比束縛エネルギーの増加分 $T_1(s_2-s_1)$ になる。なお、Note 1 の説明は、理想気体のみならず実在気体・液体について、また、相変化があっても成立する。

Note 1. 熱力学の理想：定温過程

一般に、熱力学の第一法則

$$dq=du+dW \qquad dq=dh+dW_t \qquad (1)$$

において、次の関係が成立する。

$$dq=Tds \qquad dq=Tds \qquad (2)$$

$$du=df+Tds+sdT \qquad dh=dg+Tds+sdT \qquad (3)$$

$$dW=pdv \qquad dW_t=-vdp \qquad (4)$$

定温変化($dT=0$)の場合、式(1)~(3)から、次の式が得られる。

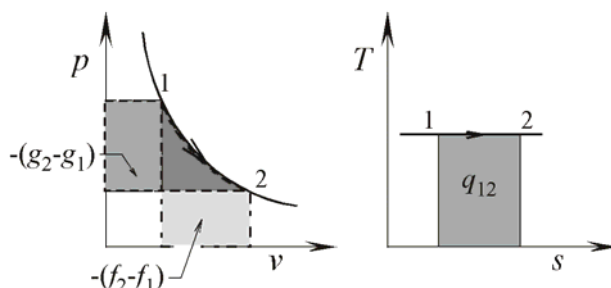
$$\underline{Tds=df+Tds+sdT+dW} \qquad \underline{Tds=dg+Tds+sdT+dW_t}$$

式(4)をあわせると、仕事については、次のとおりである：

$$\begin{aligned} dW &= -df = pdv & dW_t &= -dg = -vdp \\ W_{12} &= -(f_2-f_1) = \int_{12} pdv & W_{t12} &= -(g_2-g_1) = -\int_{12} vdp \end{aligned} \qquad (5)$$

式(2)から、熱エネルギーについては、次のとおりである：

$$\begin{aligned} dq &= d(Ts) = Tds & dq &= d(Ts) = Tds \\ q_{12} &= T(s_2-s_1) & q_{12} &= T(s_2-s_1) \end{aligned} \qquad (6)$$



3. “機械製作実習” でつくる Stirling エンジン

3.1 2ピストン型の外燃機関

“機械製作実習” でつくる Stirling エンジンは、図 10 の図面に示すものである。図 11 には、このエンジンの動きを模式的に示す。図 10 の突起部②が外から加熱(外燃)され、エンジン内部の作動流体(空気)が加熱される。それは、図 7, 8 のエンジンとは異なり、放熱フィンもディスプレイサーも再生器(熱交換器)も明らかに(陽には)備えていない。ディスプレイサーの代わりに高温側のピストン(high temperature piston, HP)④がある。このピストンは、ディスプレイサーとは異なり力を伝えることができる。図 7, 8 におけるパワーピストンは、この場合には、低温側のピストン(low temperature piston, LP)⑤と呼ばれる。このエンジンは 2 ピストン型の外燃機関である。放熱器や再生器の機能の一部は、エンジン構造体によって代用される。このエンジンは、熱力学の教科書のもの(図 9)にはほど遠いが、Stirling エンジンとは往復運動する密閉型の外燃機関である(表 1)という基本的な理解に立てば、立派な Stirling エンジン

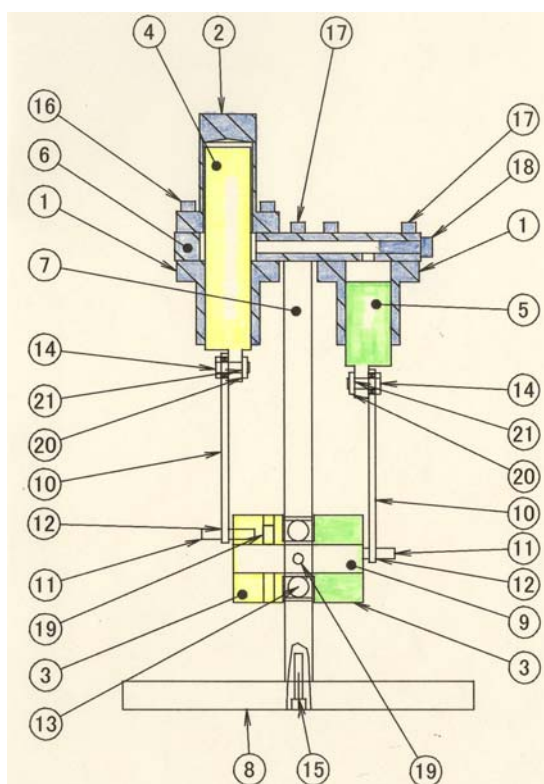


図 10. “機械製作実習” でつくる Stirling エンジン

である。そして、このようなエンジンをスターリングエンジンと呼ぶのは、機械設計製作の現場ではむしろ一般的である。すなわち、現場の理解と熱力学の講義における理解との間にはかなりの距離がある。

3.2 2ピストン型エンジンの動作の位相図

図 11 に、“機械製作実習” でつくる Stirling エンジン(2 ピストン型外燃機関)の動作の位相図を示す。高温側ピストン(HP)と低温側ピストン(LP)がある。HP の位相が LP の位相より 90° だけ先行するように動く。図中に示す時刻が、両ピストンの動作の位相に対応する。 z_{HP} と z_{LP} は、それぞれ HP と LP の位置座標である。上死点が時刻 0:00 に対応し、下死点が時刻 6:00 に対応する。時計は時計まわりに回転する。この図における z_{HP} 曲線(破線)と z_{LP} 曲線(実線)の間の距離が作動流体の体積 V に対応する。図 11 の下部に流体室内の気体の p, V, T の変化のようすを表示する。

気体の体積 V は、おもに状態 $2' \rightarrow 3'$ の過程で増加し、状態 $3' \rightarrow 4'$ の過程で最大 V_{max} になる。状態 $4' \rightarrow 1'$ の過程で減少し、状態 $1' \rightarrow 2'$ の過程で最小 V_{min} になる。2 つのピストンが回転の駆動力(power)を発生するのは、状態 $2' \rightarrow 3'$ の過程であり、他の過程では、ピストンは慣性(inertia)に依って動く。気体の圧力 p と温度 T は、流体室の全域にわたって一様に変化する。温度 T は、おもに状態 $1' \rightarrow 2'$ の過程で増加し、状態 $2' \rightarrow 3'$ の過程で最大になる。状態 $3' \rightarrow 4'$ の過程で減少し、状態 $4' \rightarrow 1'$ の過程で最小になる。

気体がおもに加熱(heating)されるのは、むしろ温度があまり変化しない状態 $2' \rightarrow 3'$ の過程においてであり、おもに冷却(cooling)されるのは、むしろ温度があまり変化しない状態 $4' \rightarrow 1'$ の過程においてである。気体の加熱・冷却という熱エネルギーの出入りと、気体の温度の増加・減少が、一対一には対応しない。それは、科学(science)における現象というより、工学(engineering)の智慧が創り出した機械の機能に属するものである。

3.3 2ピストン型エンジンのサイクル図

さて、“機械製作実習” でつくるエンジンにおいて、作動流体は空気であり、その熱力学状態は理想気体の状態式で表される。その空気は大気圧・室温の状態にあるものを体積既知の流体室に封入するので、その質量 m は評価できる。サイク

ルにおける流体室の体積 V の変化は、クランク角 (あるいは位相) θ の関数として計算できる。それゆえ、気体の圧力 p あるいは温度 T の変化をクラン

ク角 θ の関数として測定すれば、そのサイクルの pV 図や TS 図を描き、その性能を熱効率の形で定量的に評価することができるはずである。

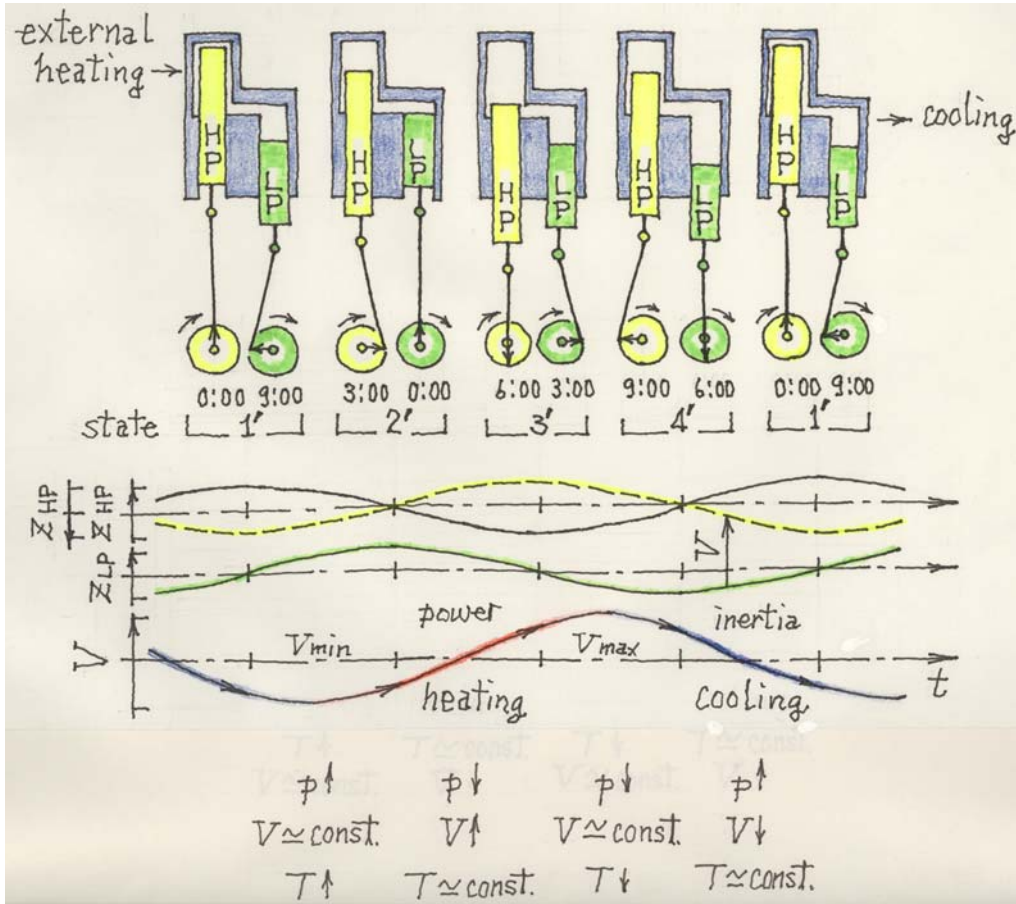


図 11.2 ピストン型外燃機関の位相図

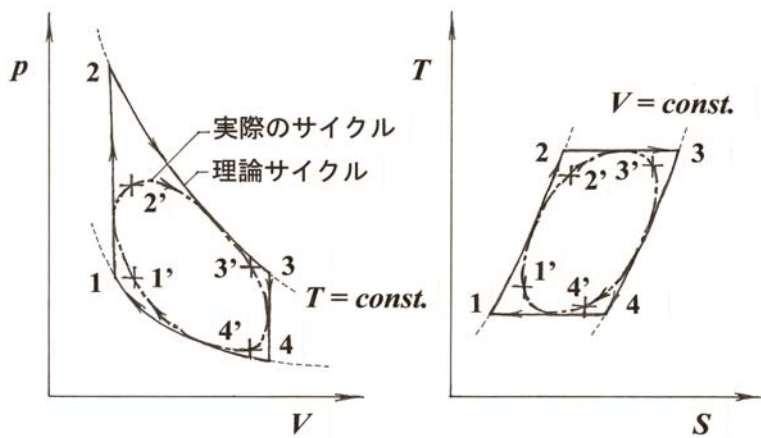


図 12. 2 ピストン型の外燃機関のサイクル (pV 図と TS 図)

図 12 には、一般的かつアバウトに、2ピストン型の外燃機関のサイクルの pV 図と TS 図を示す。Stirling サイクルの理論サイクル(実線)と実際のサイクル(一点鎖線)との違いは大きい。

4. おわりに

細かいことは、あるいは定量的にはともかく、“機械製作実習”でつくる Stirling エンジンがなぜ動くのかについて、納得し解ったであろうか？ もし “Yes” ならよし、そうでなければ、エンジンを作りながらそれを考えて、もしエンジンが動いたら、まず、よろこんで、つぎに、“なぜ動き出したのか”を考えてみてほしい。そして、“なぜ動きつづけるのか”をより真剣に考えてみてほしい。ところで、このテキストの図 11 の位相図は、貴兄の Stirling エンジンの位相図と同じであったであろうか？

謝辞 と 参考文献

このテキストを書くにあたり、本学の吉田英生教授からは貴重なご示唆・ご助言を得た。また、次の web sites を参照し、一部の図 (図 6, 8) [3]を拝借した。そもそも、この実習でつくるスターリングエンジンは、本学のオリジナルではない。web sites [4,5] には、すでに、基本的に同種のもので発表されている。ここに記して、先達の方々に感謝する。

- [1] http://www.nmri.go.jp/eng/khirata/stirling/index_j.html
- [2] http://jenny.mes.titech.ac.jp/jshinozu/Engine/engine_j.html
- [3] <http://www.rmkooubou.mce.uec.ac.jp/contents/kisokougi/stirling/st2.html>
- [4] <http://www.bekkoame.ne.jp/~khirata/academic/seminar/index.html>
- [5] <http://www.bekkoame.ne.jp/~khirata/index.htm>