低温度差スターリングエンジンの製作と実験

高橋　善樹　福島県立会津高等学校，965-0831　会津若松市表町 3-1

BXT02731@nifty.com，http://homepage2.nifty.com/ysc/

ローカルな研究会の物理分科会で，ここ数年冬の研修会として実験教材等の製作会を行なっている。世話人として今年は何にしようかといろいろさがしているうち，低温度差スターリングエンジンを思いついた。2〜3 時間で完成させるために部品のしたごしらえが必要だが，何とか予算を大きく超過しないで製作できるものを準備できた。実際作って実験してみると，低温度差の限界への挑戦や使い捨てカイロでの耐久運転，はたまた保冷剤での逆転など，実に多様な展開が楽しめる。今回製作したものの概要とそれを用いた実験のいくつかについて紹介する。

1　スターリングエンジンの基本構成

スターリングエンジンは，通常容器内に閉じ込めた空気を作業気体とし，加熱→膨張→冷却→圧縮のサイクルによって仕事を取り出す熱機関である。加熱と冷却の繰り返しは，作業気体を高温熱源と低温熱源の間で強制的に移動（または気体を固定して熱源を移動させてもよい）させて行なわれる（図 1)。したがってその基本的な構成は，高温熱源，低温熱源，膨張・圧縮により仕事を取り出す可動部およびそれと連動した気体移動のしくみからなる。ここでは，今回製作したものが含まれるディスプレーサのあるタイプについて例をあげて紹介しよう。ディスプレーサは，直訳すれば「置換器」であるが，要は作業気体の膨張・圧縮すなわちパワーピストンの動作に連動して，気体を高温熱源側と低温熱源側の間で強制的に移動させるピストンである。以下に私の手元にあるスターリングエンジンの例を紹介しよう。

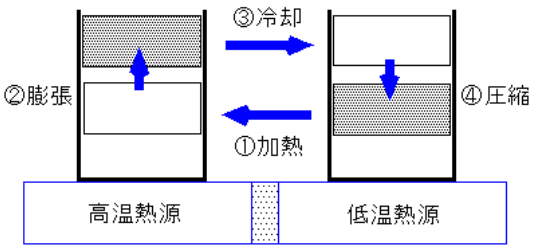

図 1　スターリングエンジンの概念図

2　スターリングエンジンの具体例

2.1　ビー玉スターリングエンジン

ビー玉スターリングエンジンは，熱機関の演示教材として安価で簡単に構成できるものとして普及している（写真 1)。高温熱源としてアルコールランプなどを用いる高温度差タイプである。注射器のピストンを固定し，シリンダーを可動部分として作業気体容器である試験管のシーソーに連動させる。ディスプレーサとしてシーソー運動にともなって試験管内をころがる数個のビー玉をそれにあてている。典型的な重力に依拠したシステムになっている。

写真 1　ビー玉スターリングエンジン

2.2　フリーピストン型スターリングエンジン

市販品で，アクリル容器にキャップとピストンが真鍮製，ディスプレーサがスポンジになっている。気体圧縮にともなうピストン復帰の際に，やはり部分的に重力の助けを借りている。ピストンが下降するとその先についた棒が容器の底に置かれたプラスチックの薄片をつつき，その変形によってディスプレーサをはねあげるしくみになっている。ディスプレーサ復帰はもちろん重力による。低温度差タイプであり，カップ 1 杯の熱湯で 2 時間程度動き続ける（要断熱）。ピストンにプラスチックシートのゆるいばねがついている以外は，基本的にフリーになっているため，温度差とともに振動の振幅が大きくなる。しかし，ばねの復元力により振動数はあまり変わらないようになっている。単純なしくみでタイミングのよいサイクルを実現した，なかなか工夫された逸品である。ピストンの慣性やばねの強さ等々，クリティカルな部分が多くて普及できるような自作は難しいかもしれないが，いずれ挑戦してみたいものである。

写真 2　フリーピストン型スターリングエンジン

2.3　低温度差スターリングエンジン

今回製作したタイプのものである。気温があまり高くなければ（20 ℃以下が望ましい）手の上にのせて体温だけで動作させることができるので，「てのひらエンジン」とも呼ばれる。ディスプレーサをクランクによってパワーピストンに連動させ，位相差で 90 °先行（正転の場合）するようにしてサイクルを実現している。パワーピストンもディスプレーサも圧力差にともなう力およびそのクランク伝達による動作のため重力に依拠することがなく，したがって設置姿勢に関わらず安定した運転が可能である（運転途中で姿勢が変わると圧力条件が変わるために停止することがある）。また，熱源の高温側・低温側をとりかえることによって逆転が可能になっている。ピストンの動作範囲が決まっているので，温度差にほぼ比例して回転数が増加する。設計上クリティカルな部分はあまりなく，密閉性と摩擦の低減に留意すればおおまかな設計でも再現性が高いので，自作に向いている。

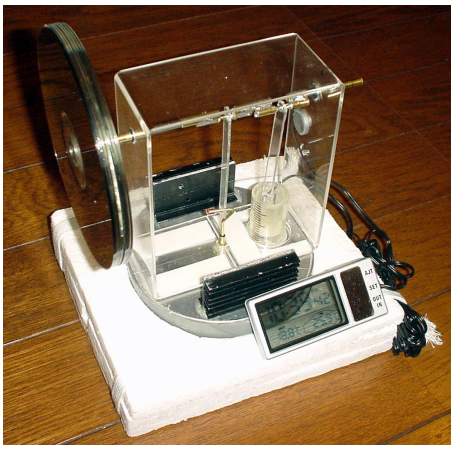

写真 3　低温度差スターリングエンジン
（熱源用断熱箱と温度計を含む）

3　製作の概要と留意点

今回の製作は基本設計においては文献［2］にならったので参照されたい。ただ，性能を落とさない範囲で，経費をなるべく低くおさえることと，準備の省力化と自作普及の観点からできるだけ手に入れやすい材料を使うという要請を課して，多少の変更を加えた。

まず，容器本体は内径 100mm の透明アクリルパイプを使うべきところを水道管用塩ビパイプを用いた。内径 107mm のものだが，同サイズで肉薄の下水用パイプがあるので間違えないように注意したい。シースルーのアクリルパイプは演示効果もあって捨てがたいよさがあるが，高価で手に入れにくい点で難がある。

また，軸受け枠はアルミ板を使うべきところを

手近にあった 2mm 厚のアクリル板を曲げて作った。丈夫にするためフォーク形でなく天板もつけて箱形とした。後から気づいたことだが，本来アルミ板を使うのには放熱をよくする効果がある。実際，実験のときに回路素子用の放熱フィンをつけてみたが，わずかではあるが効率をあげることができた。しかし，限界温度差への挑戦をするのでなければ，ドラマティックな程度ではないのでよしとした。ただ，アクリル板は折り曲げのときどうしてもくるいが生じて，ベアリング用穴の位置がわずかながらずれてしまう。ベアリングの中心軸がずれていると回転軸がベアリングに対してななめになって摩擦が大きくなる。その場合はやむを得ずベアリング穴を少しひろげて軸に垂直になるようにベアリングのほうの傾きを調整することにした。

最後にフライングホイール（はずみ車）だが，銅板または厚めのアルミ板などが推奨されるところを，不要になった CD を 5〜10 枚程度重ねてそれに替えることにした。これはもともとスターリングエンジンカーなどで車輪兼用として用いられていることにならったものだが，見た目もよくなかなか気に入っている（データ面に色のついた CDR を使うと美しい）。枚数を多くして重くすればそれだけ回転も安定するが，設計上，横にはみだした状態でつけるためあまり重くしてひっくり返らないようにしたい（軸受け枠を容器幅よりせまくとればあまりはみださずにつけることもできるだろう）。

材料や設計の詳細はここでは省略するが，製作の最大のポイントはエポキシ接着剤でしっかりシールして容器やシリンダーの気密性を確保することと，できる限り摩擦を低減することである。ちなみに私の試作第 1 号は，熱湯温度でやっと動作が確認できたほど拙い性能であったが，メンテナンスのよさを考慮して容器の組み立て（放熱部のアルミ板のとりつけ）にねじを使ったために，パッキンなど工夫してみたもののシールが不完全でリーク（漏れ）が大きいせいであることが判明して，第 2 号に作りかえた経緯がある。最終的には，ピストンが見ているうちに自重で落ちていくようなことがなければ OK である。摩擦については，前述した軸とベアリングの垂直性の確保のほか，発泡スチロール板でつくったディスプレーサが容器の内壁に触れないこと。また，シリンダーとピストンおよびディスプレーサの軸と軸受けの間のすり合わせを念入りに行い，前者は乾燥状態，後者は注油により摩擦を低減することである。

4　定積－等温サイクルモデル

スターリングエンジンは，前述したように吸熱部と放熱部の温度差によって空気を膨張・圧縮させて仕事をとりだす典型的な熱機関である。今回製作したピストンディスプレーサタイプの動作は，図 2 のようにパワーピストン PP と連動して上下するディスプレーサ DP によって強制的に空気を吸熱部（高温部）と放熱部（低温部）の間を往復させ，温度変化による膨張・圧縮でパワーピストンを動かすというものである。

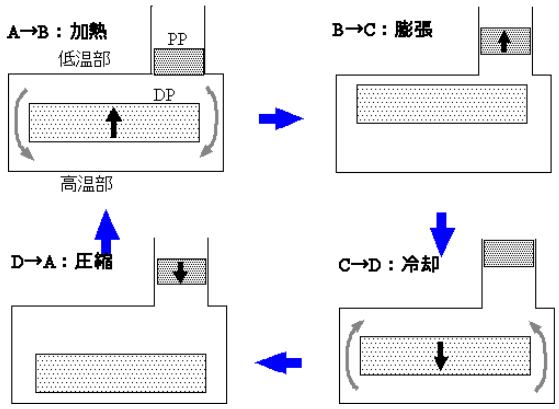

図 2：スターリングエンジンの動作

このサイクルは，おおよそ次の過程の繰り返し（図 3）として近似できる。

A → B（定積変化）：DP が上がり空気が高温部に送られて加熱。

B → C（等温変化）：空気の膨張により，PP が押し上げられる。

C → D（定積変化）：DP が下がり空気が低温部に送られて冷却。

D → A（等温変化）：空気の圧縮により，PP が引き下げられる。

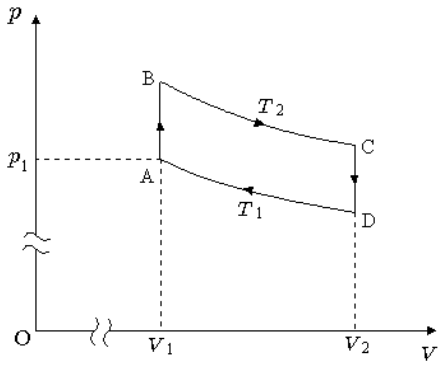

図 3：スターリングエンジンの $p-V$ 図

この簡略化によって理論的にも高校レベル（物理Ⅱ）の教材としての活用が考えられる。

私は現在「物理Ⅱ」を担当してはいないが，校内模擬試験の作問で熱力学分野を分担することになって，さっそくスターリングエンジンを登場させてみた。なお，物理準備室は3年理系教室の近くにあるため，しばらく準備室前でデモンストレーションをした低温度差スターリングエンジンの動作は，ほとんどの生徒が見ているはずである。等温曲線の積分は高校の扱いを超えるので，熱効率の理論計算などは無理だが，以下のような基礎的な扱いであれば許される範囲であろう。

校内模試問題より

（前略）…このように簡略化された考察にもとづいて下の各問いに答えよ。ただし，以下において状態 A の空気の圧力・体積・絶対温度を p_{A}・V_{A}・T_{A} のように表記（※解答の結果に用いてはならない）し，そのうち次の値が測定により与えられているものとする。

$p_{\mathrm{A}}=p_1$，　$V_{\mathrm{A}}=V_{\mathrm{B}}=V_1$，　$V_{\mathrm{C}}=V_{\mathrm{D}}=V_2$，

$T_{\mathrm{A}}=T_{\mathrm{D}}=T_1$，　$T_{\mathrm{B}}=T_{\mathrm{C}}=T_2$

また，空気の定積モル比熱を C_v，気体定数を R とし，空気は理想気体としてふるまうものとする。

(1)　p_{B}，p_{C} を求めよ。

(2)　容器内の空気の総モル数 n を求めよ。

以下において，容器内の空気の総モル数は n と与えられているものとする。

(3)　空気が過程 A → B において得た熱量 Q_1 を求めよ。

(4)　空気が過程 B → C において得た熱量 Q_2 は，図 3 のどの部分の面積にあたるか答えよ。

(5)　この熱機関において A → B → C → D → A の 1 サイクルにとりだされる正味の仕事 W は，図 3 のどの部分の面積にあたるか答えよ。

(6)　この熱機関の熱効率を上の Q_1，Q_2，W を用いて表せ。ただし熱の出入りを内部で相殺するような機能（熱交換器）はないものとする。

5　モデルによる熱効率の計算

定積－等温サイクルモデルによる熱効率を計算してみよう。ただし，空気は 2 原子分子の理想気体と考え，与えられた測定値は前述の問題のとおりとする。以下，熱は吸収を正，仕事はとりだしを正にとる。

（Ⅰ）　A → B（定積変化）：$W_{\mathrm{AB}}=0$,

$$\begin{aligned} Q_{\mathrm{AB}}=\Delta U_{\mathrm{AB}} &= nC_v(T_2-T_1) \\ &= \frac{5}{2}nR(T_2-T_1) \end{aligned}$$

（Ⅱ）　B → C（等温変化）：$\Delta U_{\mathrm{BC}}=0$,

$$\begin{aligned} Q_{\mathrm{BC}} &= W_{\mathrm{BC}} \\ &= \int_{V_1}^{V_2} p dV \\ &= \int_{V_1}^{V_2} \frac{nRT_2}{V} dV \\ &= nRT_2 \log \frac{V_2}{V_1} \end{aligned}$$

（Ⅲ）　C → D（定積変化）：$W_{\mathrm{CD}}=0$,

$$\begin{aligned} Q_{\mathrm{CD}}=\Delta U_{\mathrm{CD}} &= nC_v(T_1-T_2) \\ &= -\frac{5}{2}nR(T_2-T_1) \end{aligned}$$

（Ⅳ）　D → A（等温変化）：$\Delta U_{\mathrm{DA}}=0$,

$$\begin{aligned} Q_{\mathrm{DA}} &= W_{\mathrm{DA}} \\ &= \int_{V_2}^{V_1} p dV \\ &= \int_{V_2}^{V_1} \frac{nRT_1}{V} dV \\ &= -nRT_1 \log \frac{V_2}{V_1} \end{aligned}$$

以上の結果，熱交換器をもたないサイクルの熱効率は，

$$\begin{aligned} e &= \frac{W_{\mathrm{BC}}+W_{\mathrm{DA}}}{Q_{\mathrm{AB}}+Q_{\mathrm{BC}}} \\ &= \frac{nR(T_2-T_1)\log\dfrac{V_2}{V_1}}{\dfrac{5}{2}nR(T_2-T_1)+nRT_2\log\dfrac{V_2}{V_1}} \\ &= \frac{(T_2-T_1)\log\dfrac{V_2}{V_1}}{\left(\dfrac{5}{2}+\log\dfrac{V_2}{V_1}\right)T_2-\dfrac{5}{2}T_1} \\ &\simeq \frac{2}{5}\log\frac{V_2}{V_1}\simeq\frac{2}{5}\frac{\Delta V}{V_1}, \qquad \left(\log\frac{V_2}{V_1}\ll\frac{5}{2}\right) \end{aligned}$$

となり，体積の変化だけでほぼ決まってしまう。なお，近似は $\Delta V \ll V_1$ によるものである。

今回製作したスターリングエンジンでは，

$$\begin{aligned} V_1 &= 1.16\times10^5\ \mathrm{mm}^3 \\ \Delta V &= 2.0\times10^3\ \mathrm{mm}^3 \\ V_2 &= V_1+\Delta V = 1.18\times10^5\ \mathrm{mm}^3 \\ &\therefore \quad e\simeq 0.7\ \% \end{aligned}$$

となり，1 %に満たない。また，その出力は，

$$\begin{aligned} &p_1 = 1.0\times10^5\ \mathrm{N/m}^2, \\ &T_1 = 293\ \mathrm{K}, \quad \Delta T = 20\ \mathrm{K}, \quad N = 45\ \mathrm{rpm} \end{aligned}$$

という条件の場合，

$$\begin{aligned} W &= nR\Delta T\log\frac{V_2}{V_1} \\ &= p_1V_1\frac{\Delta T}{T_1}\log\frac{V_2}{V_1} \\ &\simeq p_1\Delta V\times\frac{\Delta T}{T_1} \\ \therefore \quad P &= \frac{NW}{t} \\ &= \frac{45}{60}\times1.0\times10^5\times2.0\times10^{-6}\times\frac{20}{293} \\ &\simeq 10\,\mathrm{mW} \end{aligned}$$

となる。

6 温度特性と限界温度差

前の考察からも明らかなように 1 サイクルあたりの仕事は，

$$W = nR(T_2-T_1)\log\frac{V_2}{V_1}\propto\Delta T$$

と温度差に比例する。仕事 W を力×変位またはトルク×回転角と考えるとき，1 サイクル内での変位や回転角はこのスターリングエンジンでは固定されているから，1 サイクル平均の力またはトルクが温度差に比例することになるであろう。速さに比例するような負荷（抵抗）があるならば，それとつりあう力またはトルクが終端速度と比例し，結果的に回転数が温度差に比例することになる。速さに比例する抵抗は，ディスプレーサの運動によって生じると思われる。

製作したスターリングエンジンを熱湯で運転し，温度がゆっくりと下がっていく状態で回転数を測定してみたところ，温度差 ΔT［K］に対する回転数 N［rpm］のデータは図 4 のようにきれいに直線上にのった。原点を通らないのは，温度差（すなわち回転速度）によって変わらない摩擦があるからであろう。ピストンやディスプレーサ軸受け，クランク軸受けなどにおける摩擦がそれにあたると思われる。

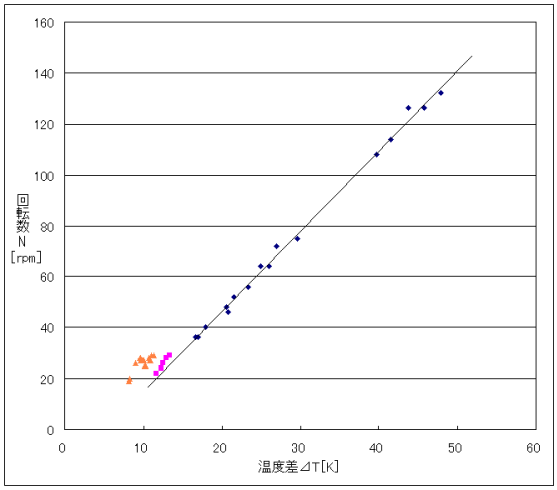

図 4：温度差と回転数の関係

低温度差部分の直線にのっていないデータは，調整後多少の改善があったときのものである。毎分 20 回転を切ると停止の確率がかなり高くなる。

近似直線の条件では，温度差 11K あたりで 20rpm を切るが，改善後のデータではそれが 8K あたりになっていることがわかる。実際，このときは 8.2K まで動作した。このあたりが動作の限界である。安定した動作を保証できるのは，やはり 10K 以上であろう。なお，温度差は吸熱部と室温（放熱部から 10cm ほど上）の差とした。初め吸熱部と放熱部との温度差を測定していたが，放熱部は室温よりやや高くなり温度差を低く見積もる結果となる。放熱の効率もエンジンの性能の一部と考えて，より実際の室温に近い温度との差をとって評価を辛くすることにした。

7　いろいろな運転形態の実際

7.1　温水による運転

前述のように，温度差－回転数特性を広い温度差範囲で測定するのに用いた。水熱量計のふたをとった状態で使用し，断熱を確保した状態で動作させると，熱湯 200ml で運転を開始したとき 2〜3 時間は動いてくれる。入れた直後はかなりの高速運転になり見ごたえがある（写真 4）。

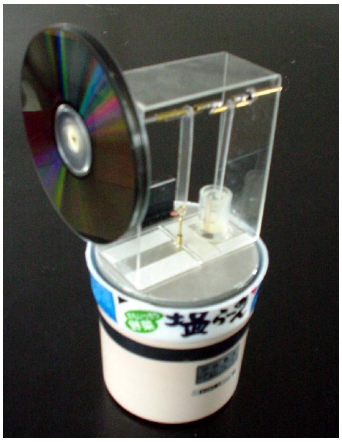

写真 4：お湯で運転中

7.2　使い捨てカイロによる運転

使い捨てカイロを発泡スチロールでつくった断熱箱に入れて高温熱源とする（写真 5）。長時間運転が可能で，まる 2 日以上継続して動作させることができる。ただし，途中 1〜2 度カイロを出してリフレッシュ（もみほぐし）してやるとよい（リフレッシュしすぎると動作時間が短くなる）。使い捨てカイロは，周囲の気温に追随して温度が上下するので，うまく調整すると十数度の温度差を保ちながらのんびりとした低温度差運転を持続する。展示してデモするのには最適である。

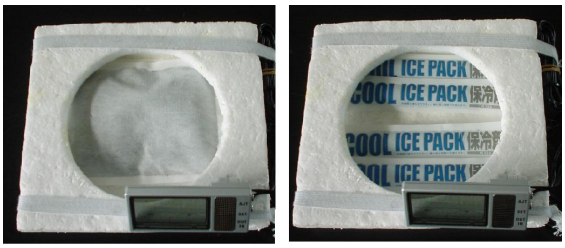

写真 5：使い捨てカイロ（左）と保冷剤（右）による熱源

7.3　保冷剤による運転

お湯やカイロ，てのひら上での運転の場合に放熱部に氷や保冷剤を置くと，温度差が拡大して回転数が上がる。一方，吸熱部（高温熱源）と放熱部（低温熱源）を上下入れ替えると，回転方向を逆にした運転ができる。そこで，使い捨てカイロ用につくった断熱箱にスティック状の保冷剤を入れて逆転させてみた（写真 5）。外気温が低すぎなければ，やはり低温度差による動作が継続できる。保冷剤スティック（約 10g）4 本で約 3 時間動き続けた（気温 15〜20 ℃）。冷たいものを「燃料」にするという意外性があり，演示効果が期待される。

参考文献

[1] 「スターリングエンジンの開発」
岡山県教育センター　生部昭光
http://www.edu - c.pref.okayama.jp/sien/kyouka/rika/buturi/stirling/okayama1_gou/PAGE001.HTM

[2] 「掌エンジン（低温度差スターリングエンジン）」
http://www.geocities.jp/kkikuchi0025/tenohira.htm
「お湯で走る車 710 号」
http://www.geocities.jp/kkikuchi0025/710.htm

（2005.11.24）