

1999. 1

電総研ニュース

ISSN 0011-846X

<http://www.etl.go.jp/publication-j/news-j.html>

1999年 1月 588号



- 年頭のご挨拶
- 高い光非線形係数($3.5 \times 10^{-6} \text{esu}$)を持つJ会合体の薄膜の簡単な合成方法
- スターリングエンジン超入門

年頭のご挨拶

所長 梶村 皓二

皆さん、明けましておめでとうございます。

本年1999年は1900年代の最後の年として歴史の節目が間近にやって来ることを予感させる年です。この1900年代の100年間電総研はダイナミックに活動してきました。この100年間の歴史を踏まえ、21世紀へ向けて電総研が目指してゆく方向についてお話ししたいと思います。

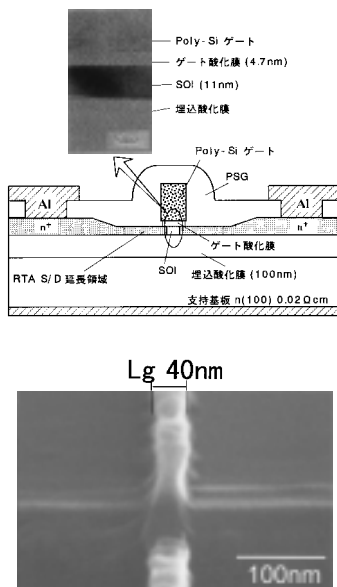
さて、電総研は電子技術の研究を通して、公共に貢献することが使命・役割であると思っています。私はこの「公共に貢献する」という言葉に大変な重みがあると思います。我々が日々行っている研究が優れた洞察に基づいているとしても、社会に対し説明なしに我々のやり方を押し付けておいて貢献していると主張するなら、電総研は要らないということになるでしょう。この電総研の役割、使命を念頭に置きつつ

自らの研究の意義を私達自身に問いかけたいと思います。

昨年も電総研からたくさんの優れた研究成果が発表されました。昨年の研究成果のいくつかの例についてお話ししましょう。近年の情報技術の進歩は社会生活に大きな変化を与えています。電総研では、COEや、RWCプロジェクトで計算機やデータを安全に且つ快適に利用するための基礎技術や、計算機や知能ロボットの研究開発、さらに情報科学の立場から人間自身を知るための研究を行っています。これらの地道な研究の積み重ねによって新しい流れを築き上げて来ました。昨年注目されました電総研の事情通口ロボットの研究は、この新しい流れの中で生み出された情報技術を展開し成果を挙げている研究の一つです。この事情通口ロボットの研究はRWCプロジェクトでの認識・学習に関する基礎的研究成果をシステムとして組み込むことにより、将来における知能ロボット研究の音声、画像、自然言語、記憶・学習アルゴリズムの一つのありかたを示しました。

また昨年、電総研の二重ゲート電界効果トランジスタ(XMOSFET)の研究の新しい展開がありました。15年前このデバイスの研究成果が発表された時点では、当時の半導体産業の技術と比較すると先進的な成果でしたが、デバイスの極微細化が進むにつれ、極短チャンネルMOSFET構造の中でも最も合理的な構造であることが現在世界的に認識されるに至っています。15年の時の流れを経た技術の展開により、電総研のXMOSFETの存在が専門家の中で強く認識されるようになって来ました。

ところで電総研で開発されている多彩な要素技術はジグソーパズルのひとつのピースや電子回路のひとつの部品に例えられるかもしれませんが。電総研で開発された要素技術は、他のいくつかのピースとう



図は、試作した導電性のシリコン支持基盤の上に薄い埋込酸化膜及び単結晶シリコン層を持つSOIウエハを用い、チャンネル領域の厚さをきわめて薄くした素子にすればXMOS素子に近い構造となる。

まく組み合わせることにより産業技術としてひとつの体系の中に組み入れられ、その価値を発揮するでしょう。また、別の産業技術の体系に組み入れられると、新たな別の機能を発揮するでしょう。しかしながら、短い時間の内に中途半端なピースを作り上げたり、とりあえずのジグソーパズルの絵を描いて行くことは公共の研究機関である電総研の使命ではありません。昨年の研究成果の例でお話ししました様に、電総研は本物の技術を熟成させ、質の高い研究を練

りあげ、多くの技術者や専門家を納得させ、大きな流れを築き上げながら、優れた研究成果を社会へ送り出して来ました。

電総研が、地に足を付けた、本物の仕事をする研究者の集団でありつづけること、これこそ私たち電総研が「公共に貢献する」ものを社会へ生みだしていく原動力になると思います。

表紙写真 まもなく21世紀を議論

松井俊浩情報科学部主任研究官(左)、梶村皓二所長(中央)、関川敏弘電子デバイス部主任研究官(右側)



オフィスロボット Jijo-2



頂上にうっすら雪 筑波山

高い光非線形係数(3.5×10^{-6} esu)を持つ J 会合体の薄膜の簡単な合成方法

Cyanine J aggregates film with high optical nonlinear susceptibility

エネルギー部 自己組織化ナノヘテロ材料ラボ 周 豪慎^{*}、本間 格

Self-Organized Nano-hetero Lab, H. S. Zhou^{*}, I. Honma

^{*} E-mail: hszhou@etl.go.jp

Thin silica film doped with condensed cyanine J aggregates was synthesized by a simple sol-gel processing. In spite of containing plenty of the J aggregates, the film was homogeneous in thickness and stable at room temperature. The third order optical nonlinear susceptibility of the J aggregates was investigated by a Z-scan method with a 180 femto-seconds pulse laser, it was about 3.5×10^{-6} esu at the resonant on condition of the J aggregates. The film is useful as practical materials for nonlinear optical devices.

1. はじめに

21世紀は情報の時代と呼ばれている。我々が取り扱わなければならない情報量は加速度的に増えている。これを解決するために、光による情報処理、演算、記録に基づく光エレクトロニクスあるいはフォトニクスにおける発展が大きく期待されている。このために、光学的非線形の高い物質を利用した波長変換素子や超高速光スイッチ、光ファイバ、光双安定性メモリと並列超高速光論理演算素子などが必要である。光ファイバや光メモリの実用化により、情報の伝達と保存は既に実現されているが、光情報処理装置は未発達な段階にある。これは、光情報処理装置を構成する光論理回路のための低光輝度で非線形機能を発現する優れた非線形光学材料が未だ創成されていないからである。

我々は極めて簡単なゾルゲル法によりシリカマトリックス中に高密度に(体積比で約15%)室温で安定なJ会合体を均一にドーピングすることに成功した。パルス幅180フェムト秒の超短パルス幅のレーザーでZ-scan法により測定された色素J会合体の非線形電気感受率⁽³⁾の絶対値は $\sim 4 \times 10^{-6}$ esuという極めて大きな値が得られた。

2. シアニン色素J会合体(期待される所と問題点)

現在加工と成形の容易な有機系非線形光学材料として幾つかの有望な材料が知られているが、それらの中にシアニン色素がある。シアニン色素は窒素原子を持つ複素環構造をメチン鎖で連結した構造の化学物質の総称であり、銀塩写真技術やフォトレジ

スト技術における増感剤として、これまで重要な役割を担ってきた長い歴史がある。近年シアニン色素分子の凝集状態の一形態であるJ会合体が非常に大きな3次の非線形感受率を持つメソスコピック系であることが発見された。そこで、その非線形光学特性に基づく光情報処理用非線形光学素子への応用の期待が高まっている。

有機系非線形光学材料は加工や成形がしやすいなどのメリットが注目されているが、安定性に問題があり、実用の段階に至るには困難な状況がある。特に、実用シアニン色素J会合体材料は単にその非線形光学特性を有するだけでなく、(1)物性測定やデバイス作製における取り扱いの容易さから材料形態が薄膜であること、(2)J会合体が高密度に含まれていること、(3)合成が簡便であること、そして(4)J会合体が安定に存在することが要求される。

これまでに、シアニン色素J会合体の材料形態は、溶液、LB膜、結晶、ポリマー分散膜等が知られている。しかし、上述の各材料形態の各々について長所と短所があり、4つの条件を十分に満たす理想的な材料形態が現在も模索されている。例えば、良く使われているLB製膜法で、合成したシアニン色素J会合体膜は安定が弱くて常にArgon雰囲気中保存しなければならない、また、製膜にもかなり手間がかかる。

3. 高密度なJ会合体薄膜の簡単な合成法

我々は極めて簡単なゾルゲル法によりシリカマトリックス中に高密度に(体積比で約15%)室温で安定なJ会合体を均一にドーピングすることに成功した。

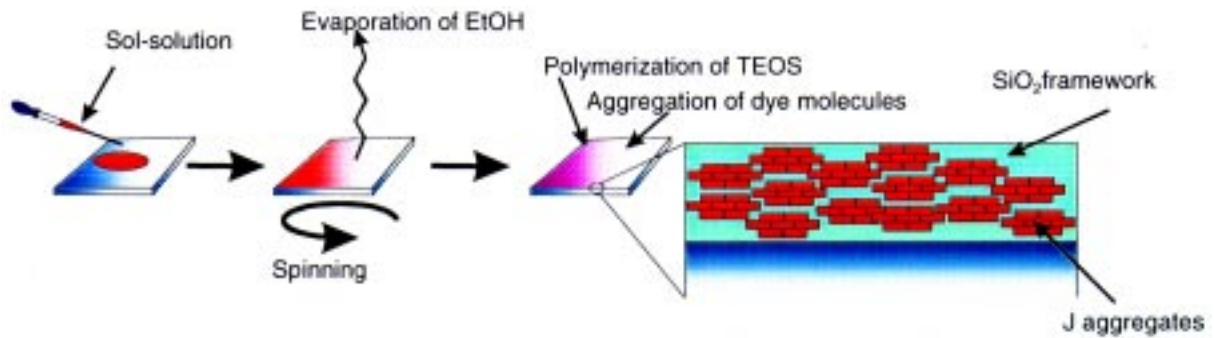
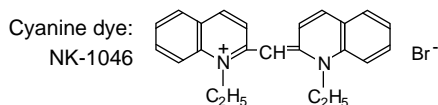


図1 シアニン色素ドーブ環境の作成プロセス



シアニン色素(NK-1046)を含むシリカゾル溶液の調製は以下の手順で行った。(1)テトラエトキシオルソシリケート(TEOS)とエタノールを十分に攪拌し、(2)その溶液に少量の希塩酸を加え攪拌した。(3)さらに、シアニン色素を加えて十分に攪拌し、ゾル溶液を調製した。次に、図1に示すように、ゾル溶液を石英基板上に適量滴下し、基板を高速回転することにより、石英基板上にシアニン色素J会合体ドーブしたシリカ薄膜を形成させた(スピんキャスト法)。形成した膜は極めて薄く、厚みは約150nmである。

ゾル溶液は赤色(色素単量体の色)であり、色素ドーブシリカ膜は紫色(J会合体の色)である。膜の色の变化はスピんキャスト過程の回転過程に起こり、この回転過程での色の变化がJ会合体の形成を示す。図2の中に、ゾル溶液のスペクトル(曲線(a))において、波長495nmと528nmのところに単量体由来の吸収ピークがあり、ゾル溶液のスペクトルは赤色溶液であることを示している。このゾル溶液のスペクトルには会合体の形成を示すピークが全く現れず、ゾル溶液中で色素分子が会合体を形成しないことを示している。一方、色素ドーブシリカ膜のスペクトル(曲線(b))において、キノリン環と単量体の吸収ピークとともに波長576nmのところにJ会合体由来の先鋭なピークが現れ、シリカ膜は紫色を呈する。

スピんキャスト法による膜作製におけるゾル溶液からシリカ膜形成に至る過程において、主に(1)EtOHの蒸発、(2)色素の凝集、(3)TEOSの縮重合反応の3反応が競合すると考えられ、これら

の反応の優劣はゾル溶液の濃度、温度、溶液のpH等に依存し、最終的に生じるシリカ膜中の色素の会合状態が異なると考えられる。

4. 3.5×10^{-6} esuの⁽³⁾を達成

パルス幅180フェムト秒の超短パルス幅のレーザービームを1kHzで繰り返し発振するレーザー装置を用い、Z-scan法により、液体窒素により冷却しながら真空中における膜の非線形光学特性を測定した。

図3は波長577nmにおけるZに対する透過率の変化を示す。同様にJ会合体吸収バンド付近の波長で数点透過率変化を測定した。J会合体吸収ピーク付近の波長577nmでの⁽³⁾の絶対値は 5×10^{-7} esuという極めて高い値が得られた。

この値はシリカとシアニン色素とで構成される色素ドーブシリカ膜全体の値である。そこで、膜中の色素の体積比から色素の正味の⁽³⁾の絶対値を見積もると、⁽³⁾の絶対値は 3.5×10^{-6} esuとなる。これまでに報告されているLB製膜法で作られたシアニンJ会合

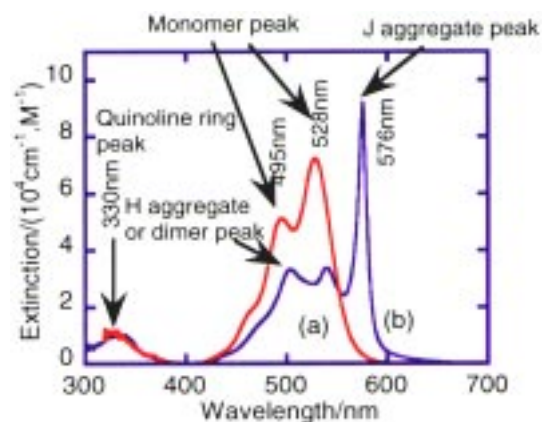


図2 紫外可視吸収スペクトル。(a)ゾル溶液、(b)色素ドーブシリカ膜。

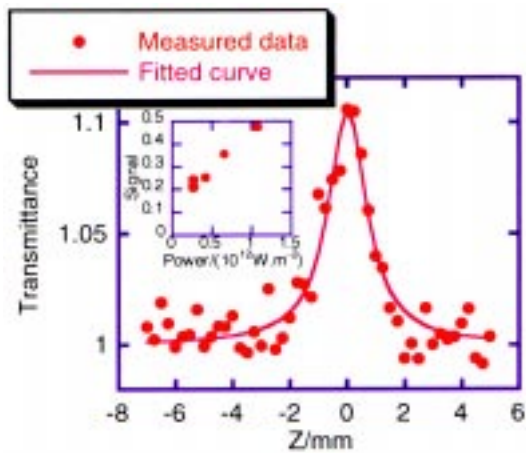


図3 波長577nmで測定されたZ-scanデータ

体膜の⁽³⁾は約 10^{-10} esuであり、また、溶液のシアニンJ会合体の⁽³⁾は約 10^{-11} esu(これはピコ秒の短パルス幅のレーザーで測ったもの)である。この値はこれまでのシアニンJ会合体の⁽³⁾より3から4桁ぐらい大きい、またこれまでに知られている他の非線形光学材料と比べても非常に大きな値である。

5. 今後の展望

シアニン色素にJ会合体を形成させる方法として様々な方法が考案されているが、実用材料として用いることが可能な材料形態は極めて少ない。我々が報告するシアニン色素ドーブシリカ薄膜の合成方法は極めて簡便な方法でありながら、この合成方法によってシアニン色素分子のJ会合体を高密度にシリカ膜中に均一に形成させることが可能である。さらに、この膜が持つ3次の非線形感受率の絶対値は 5×10^{-7} esu(真空中)という極めて高い値を有することから、実用光素子開発実現への道が大きく開けるだろう。

しかしながら、大気中で膜に高輝度光照射を行うと、膜中の色素分子と一重項酸素が反応し、色素分子自体が分解してしまう。そこで、大気中での光照射による色素分子の分解の抑制、即ち耐光性の向上が今後の課題となる。

(本研究は計量研の三戸章裕及び東京大学の渡辺崇、浅井圭介、石樽顕吉と共同研究によるものである。)

スターリングエンジン 超入門

極限技術部 川田正國

e-mail:kawada@etl.go.jp

サイエンスキャンプ'98「模型スターリングエンジンを作ろう」コースで用いたテキストに多少手を加え、スターリングエンジンの特徴とその動作原理について簡単に説明します。

● 内燃機関と外燃機関との違いは？ ●

エンジン(熱機関)とは熱エネルギーを動力に変換する一種のエネルギー変換装置です。エンジンには自動車エンジンやジェットエンジン等の**内燃機関**と蒸気機関車や発電所の蒸気タービン等の**外燃機関**の二つに分類されます。

スターリングエンジンは外燃機関の一つで、シリンダ内に密封された作動流体(一般にヘリウムや水素ガスが用いられています)を外部から加熱と冷却により得られる圧力変動を利用して動力を取り出すことができます。それでは蒸気機関とスターリングエンジンとはどこが違うのでしょうか。その違いは蒸気機関では、作動流体である水の相変化(液体と気体)を利用していますが、スターリングエンジンは単相の気体(ヘリウムや水素)を使用していることです。

内燃機関と外燃機関との違いはまた、次のように説明できるでしょう。

作動流体に着目すると、熱機関は全て作動流体を加熱してそれが膨張しようとする力をピストンやタービンで受け止めて出力(動力を発生)します。作動流体の加熱には一般に燃焼を用いますが、この燃焼が作動流体の中で行われるのが内燃機関であり、外部で行ないその熱をシリンダの伝熱面を通して作動流体に伝えるのが外燃機関です。

したがって、内燃機関の場合、1回燃焼を生じると作動流体は化学変化を伴うので、1サイクル毎に新しい作動流体を取り入れる必要があります(車のエンジンを思い浮かべてみましょう)。一方、外燃機関では作動流体は加熱されるだけで、内燃機関のように化学変化を引き起こさないの、これを冷却すれば再利用することが出来ます。

内燃機関：開放式サイクル
外燃機関：密閉式サイクル

● スターリングエンジンの発明から開発の歴史 ●

1816年にスターリングエンジンが発明される以前、イギリスは産業革命が全盛だったので、工業が盛んでした。そのために鉱山の排水ポンプや工場の動力源としてワット(J. Watt: 1736~1819)が発明した蒸気機関が沢山使われていました。蒸気機関から大きな動力を得るためには、当然のことながらその動作圧力を次第に高くするようになりました。そのためにボイラーの爆発事故が多発しました。

ロバートスターリング(Robert Stirling)はスコットランドのクローグで生まれました。1815年に伝道師の許可を得て、翌年の1816年に牧師となりました。スターリングは1816年にスターリングエンジンを発明しましたが、この時彼は26才でした。この時は空気を作動流体に用いていたので、熱空気エンジン(hot air engine)と呼ばれていました。最初のエンジンは1818年に作られ、約2年間動いていたということです。そして88才で亡くなるまでに、多くの熱空気エンジンを考案したことによって、セントアンドリュース大学から名誉博士が与えられました。

図1にロバートスターリングと熱空気エンジン(スターリングエンジン)を示します。

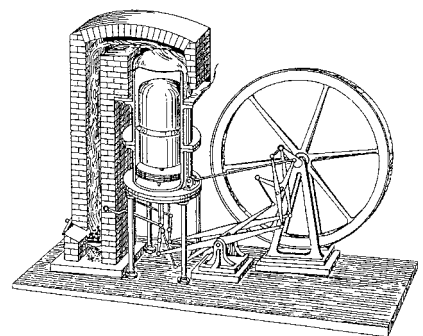


図1 ロバートスターリングとスターリングエンジン

その後も蒸気機関のボイラー爆発の危険性がつきまとっていたので、スターリングエンジン以外のエンジンも研究開発が進められていました。1876年にドイツの技術者であるオットーが、ガソリンエンジンの元祖とも言えるガス機関を発明しました。また、1894年にはドイツのディーゼルによってディーゼルエンジンが発明されたので、スターリングエンジンはこれらのエンジン(内燃機関)に対抗できず次第に姿を消してしまいました。

このように技術が進展していく中で、スターリングエンジンの有用性を高く評価したオランダのフィリップス社(Philips)は、1930年代から世界に先駆けてスターリングエンジンの研究を始めました。その結果、いろいろな目的に使われるエンジン、例えば小型発電機用から大型バス(DAF: van Doorne's Automobielfabriek)搭載用のエンジン等を開発しました。このころから作動流体にヘリウムガスや水素ガスが用いられるようになりました。フィリップス社は1980年にスターリングエンジンの開発を止めますが、その高い技術はゼネラルモーターズ社(General Motors)、フォード社(Ford Motor Company)及びUnited Stirling社等の企業にうまく移転されました。

日本でも海外の動きに遅れまいと、1976年から1981年まで運輸省、運輸省船舶技術研究所、日本造船研究協会及びダイハツディーゼル等によって船舶用エンジンの研究開発が行われました。また、1982年から1987年まで通産省の指導によって工業技術院のムーンライト計画においてスターリングエンジンの研究開発が行われました。

● でもスターリングエンジンを 見かけないのは何故? ●

スターリングエンジンは1816年にスターリング兄弟(Robert StirlingとJames Stirling)によって発明された、空気を作動流体とする外燃式のピストンエンジンです。外燃式であるために多種の燃料を使用することが出来、騒音や振動が低く、低公害であるという特徴を持っていました。また、そのサイクルが可逆過程のみからなるために理論効率が高く、カルノー(Carnot)効率と同じです。

熱機関は作業物質(作動流体)を使って高温熱源から熱を吸収し、その熱の一部を機関を通して外部に対する仕事に変え、残りの熱を低温熱源に放出し、機関はまた元の状態に戻って同一の過程を繰り返しま

す。

カルノーサイクルとは一つの作動流体(例えば空気)が二つの等温変化と二つの断熱変化(例えば等温膨張、断熱膨張、等温圧縮、断熱圧縮の順序で変化させ、最後に始めの状態に戻る)からなる変化をし、その変化が極めてゆっくり(準静的と呼んでいます)で、作動流体が平衡状態にあり、かつシリンダの熱伝導による損失とか摩擦のない理想的なサイクルのことです。

しかしながら、初期のエンジンは、出力や熱効率ともに理論値より相当低いものでした。それは実際にエンジンを作るとなると複雑で難しく、今のよう高温に耐える材料もなかったからです。現在のようスターリングエンジンの研究開発は、フィリップス社によって開始されました。

最近になって地球環境問題に対する意識が高まり、スターリングエンジンはその低公害性という特徴及び効率の向上が図られたことから、再び注目されるようになってきました。例えば欧米では太陽熱発電用のスターリングエンジンシステムや可搬型の小型発電装置が、中国等ではコジェネレーション用のスターリングエンジンが研究されています。

それでは何故このような素晴らしいエンジンが実用化されないのでしょうか?

それはガソリンエンジン等の内燃機関と比べて大きくて重いこと、出力を大きくするには高い圧力が必要であること、そして内燃機関にくらべて耐久性が劣ることでしょう。エンジンが大きくて重たくなるのは、小型の熱機関で効率を高くするのは困難であること、また作動流体は高い圧力で封入しなければならないので、エンジンのシリンダ等はその圧力と温度に耐えられなければなりません。さらには日本の場合、このエンジンを一般家庭に設置したとすると、高圧ガス保安法によって規制される可能性もあります(資格を持った人がいないと使えない)。

● スターリングエンジンは 温度差を与えると動く? ●

スターリングエンジンの動作原理を、図2によって説明しましょう。同図(a)に示すシリンダを加熱すると、中に入っている作動流体(例えば空気)が膨張して圧力が上昇し、その力でピストンが動きます。次に同図(b)に示したように、ピストンを動かさないようにして冷却すると、中の圧力は低下します。ま

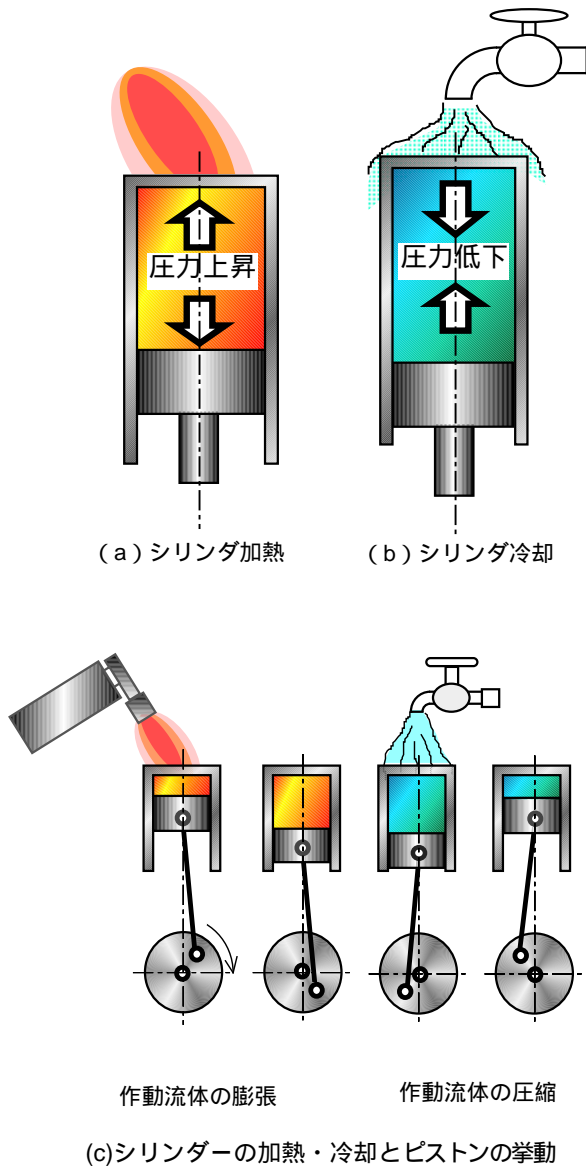


図2 シリンダの加熱・冷却による圧力変化とピストンの挙動

た、ピストンを自由にしておけば、加熱の場合とは逆の方向に動きます。

それでは同図(c)に示すようにピストンの往復運動を回転運動に換えるような機構とフライホイールを付けます。密封されたシリンダ内でピストンが上死点から下がる過程で作動流体の圧力を高くすれば、ピストンが下がる過程で大きな力が得られことになり、正の仕事をします(外部に対して仕事をする)。一方、ピストンが上がる過程では負の仕事(外部から受ける仕事)となりますが、この時圧力を低くすれば仕事は少なくて済みます。したがって、ピストンが下がる時に得られる正の仕事から上がる時の負の仕事の絶対値を差し引いたものが、エンジンから動力

として取り出すことが出来ます。すなわち、スターリングエンジンで出力を発生させるためには、ピストンの変位に対応して作動流体の圧力を変化させる必要があります。作動流体の圧力を変化させるには温度を変化させればよいことになります。ただし、これではエンジンをうまく動かすことは出来ないでしょう。

● スターリングエンジンはどのような構成になっているか ●

それでは連続的に運転するにはどうしたらよいでしょう。それには適切な位相差をつけた2つのピストン(ディスプレイサピストンも含みます)と高温と低温の2つの温度領域が必要です。こうすればスターリングエンジンになります。位相差は理想的な場合90度となりますが、実際のエンジンでは容積が限られているので、90度とは異なります。

スターリングエンジンには2つのピストン(圧縮及び膨張)を用いた2ピストン形スターリングエンジンと1つのディスプレイサピストン(膨張)と1つのピストン(圧縮)を用いたディスプレイサ形スターリングエンジンの2つの形式に分類されます。以下ではそれぞれのエンジンの特徴を簡単に説明します。

2ピストン形スターリングエンジン

2ピストン形エンジンの概略を図3に示します。図の左側は高温(膨張)シリンダで、作動空間は常に高温に保たれています。一方、右側は低温(圧縮)シリンダで、作動空間は常に冷却されています。エンジン内部の圧力変動(振幅)はそれぞれのシリンダの中にあるピストンの変位によって発生します。2つのピストンは適切な位相差をもってクランク軸につながっています。ここではフライホイールは矢印の方向に回転し、膨張ピストンが上死点にあるときを回転角の基準とすれば、圧縮ピストンはそれよりも90度遅れて動きます。以下では、2ピストン形スターリングエンジンの動作原理について簡単に説明します。

加熱過程(図3:A~B)

高温(膨張)ピストンが上死点から90度までの間、高温ピストンは上死点から下向きに、低温ピストンは上向きに変位します。2つのピストンの変位によって、作動流体は低温作動空間から再生蓄熱器内で熱交換(蓄熱材から熱を奪い、流体の温度が上昇する)しながら加熱器で加熱され、高温作動空間に向かって流出

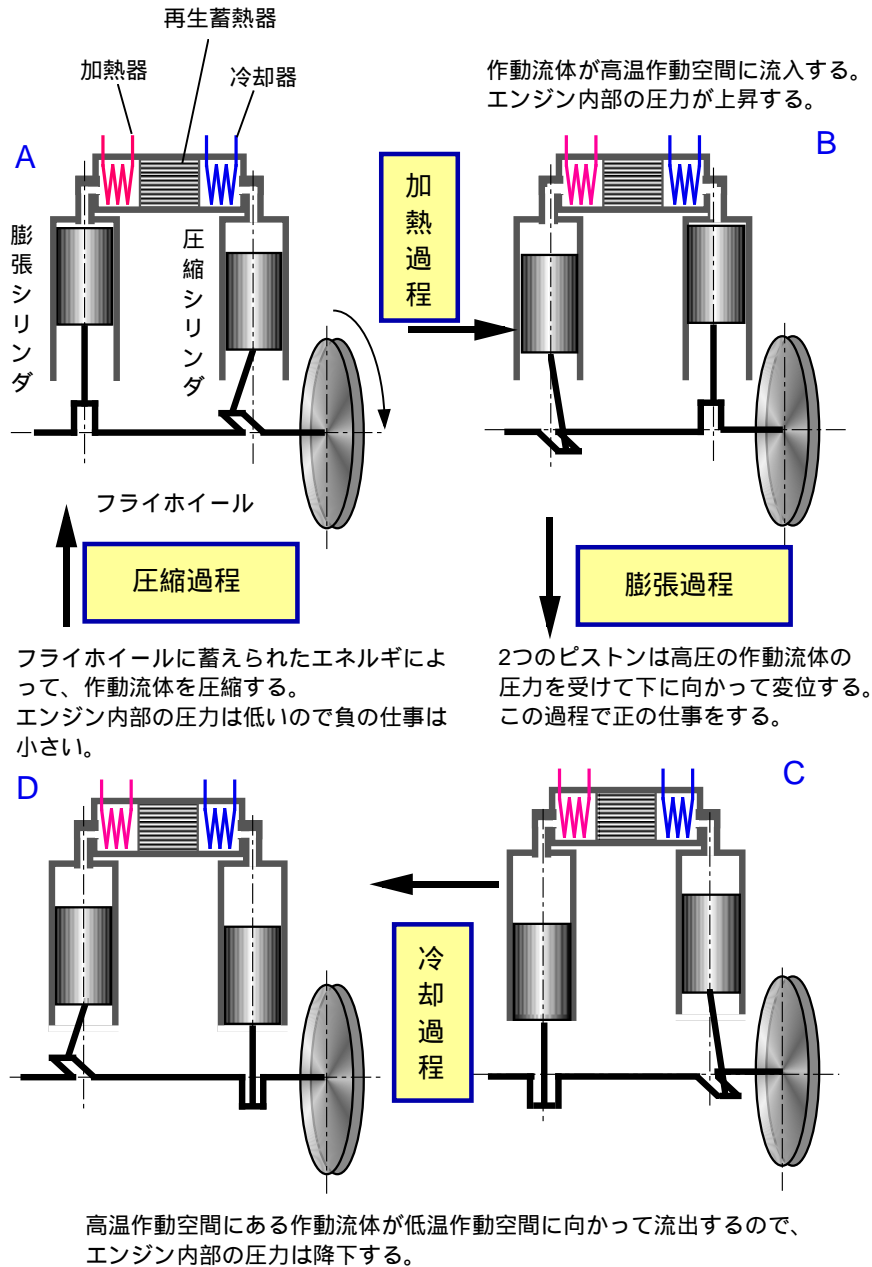


図3 2ピストン形スターリングエンジンの動作原理

します。高温作動空間に流入した作動流体は高温になっているので、エンジン内部の圧力は上昇します。

膨張過程 (図3 : B ~ C)

さらに90度 (90度 ~ 180度まで) の間、2つのピストンは高圧の作動流体の圧力を受けて下向きに変位します。この過程では作動流体の仕事をフライホイールに蓄え、さらに機械的エネルギーに変換され、動力を発生します (正の仕事)。

冷却過程 (図3 : C ~ D)

さらに90度 (180度 ~ 270度まで) 回転させると、膨張ピストンは上向きに、圧縮ピストンは下向きに

変位します。この過程で作動流体は、高温作動空間から再生蓄熱器内で熱交換 (蓄熱材に熱を与えながら、流体の温度が低下する) しながら冷却器内で放熱し、低温作動空間に向かって流出するので、エンジン内部の圧力は低下します。

圧縮過程 (図3 : D ~ A)

次の90度 (270度 ~ 360度まで) ではフライホイールに蓄えられたエネルギーの一部を使って2つのピストンを上向きに変位させると、作動流体は圧縮されず (負の仕事)。

ディスプレイサ形スターリングエンジン

ディスプレイサ形スターリングエンジンは高温(膨張)側にディスプレイサピストンを、低温(圧縮)側にピストンを用いたエンジン形式で、前に説明した2ピストン形エンジンとは異なります。そこで最初にシリンダの中でディスプレイサピストンを変位させることによって、内部圧力の変動が発生することを説明しましょう。

シリンダ内で1つのディスプレイサピストンが変位すると圧力が変化する

図4に示すとおり、密閉されたシリンダの中に1つの熱交換器が入っています。作動流体は熱交換器の中を高温側から低温側へ、またはその逆の方向に向かって自由に通過することが出来ます。図中、熱交換器の左側は高温部容積(高温作動空間)で、作動流体は高温に保たれています。一方、右側は低温部容積(低温作動空間)であり、その中の作動流体は冷却することによって低温(一般には室温付近の温度)に保たれています。

このように、シリンダの一端を高温に、他端を低温に保って温度差をつけ、一定容積の中を熱交換器が

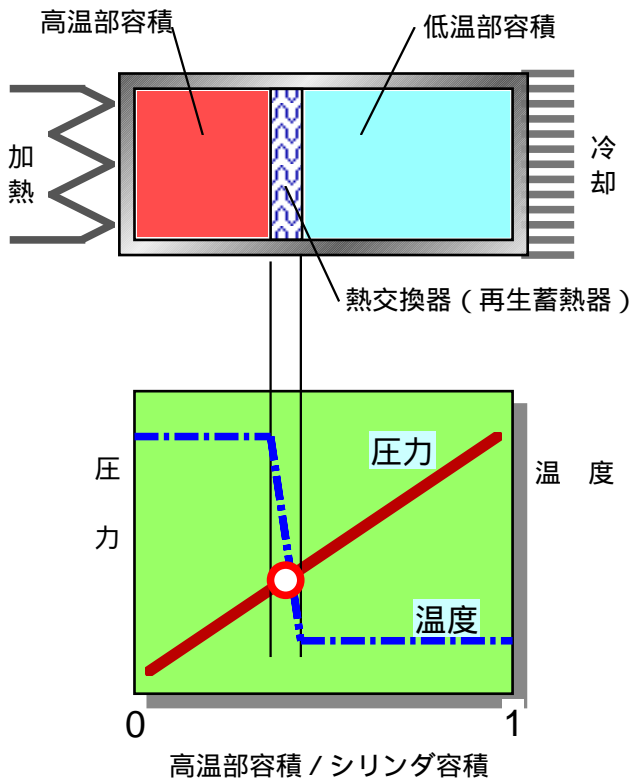


図4 1つのシリンダ内で熱交換器が変位する場合の圧力と温度の変化

変位すると、圧力も変化します(その様子を模式的に示すと図4の下の図になります)。図から分かるように、1つのシリンダで左側が高温に、右側が低温に保たれている場合、その間を熱交換器が右向きに変位すると全体の容積に対する高温作動空間の割合が大きくなるので、シリンダ内部の圧力は上昇します。一方、左に向かって変位すると、低温作動空間の割合が大きくなるので、内部の圧力は降下します。すなわち、熱交換器の変位によってシリンダ内部の圧力は変化することになりますが、低温側と高温側作動空間の圧力は同じです。そして、このままでは熱から仕事への変換である動力の発生はないのが特徴です。

図5にスターリングエンジンへの応用を考えたディスプレイサシリンダを示します。同図(a)は熱交換器(再生蓄熱器)を内蔵したディスプレイサピストンを、同図(b)にはディスプレイサシリンダとは別に加熱器、冷却器及び再生蓄熱器を配置した構成となっています。どちらも同じですが、小型のエンジンでは一般にディスプレイサピストンに再生蓄熱器を内蔵しています。

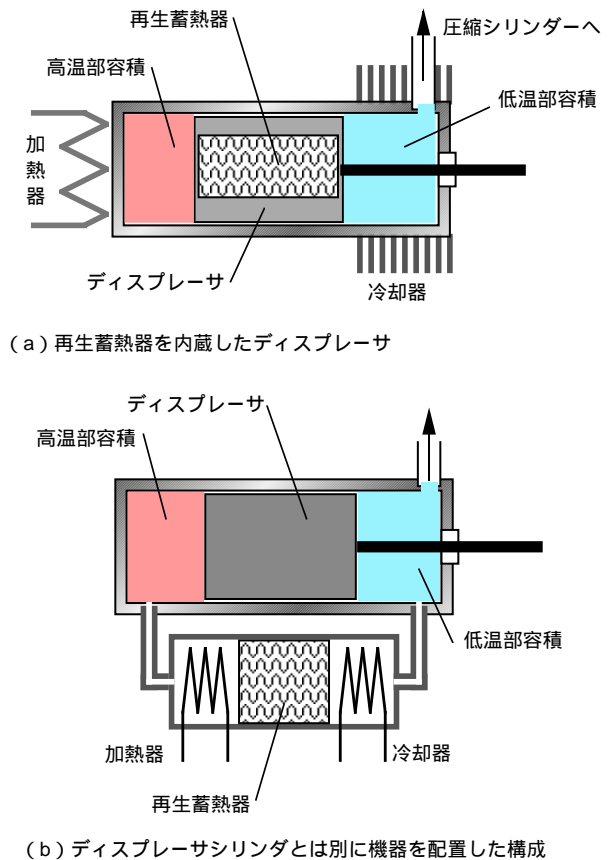


図5 ディ스플레이サシリンダの構造

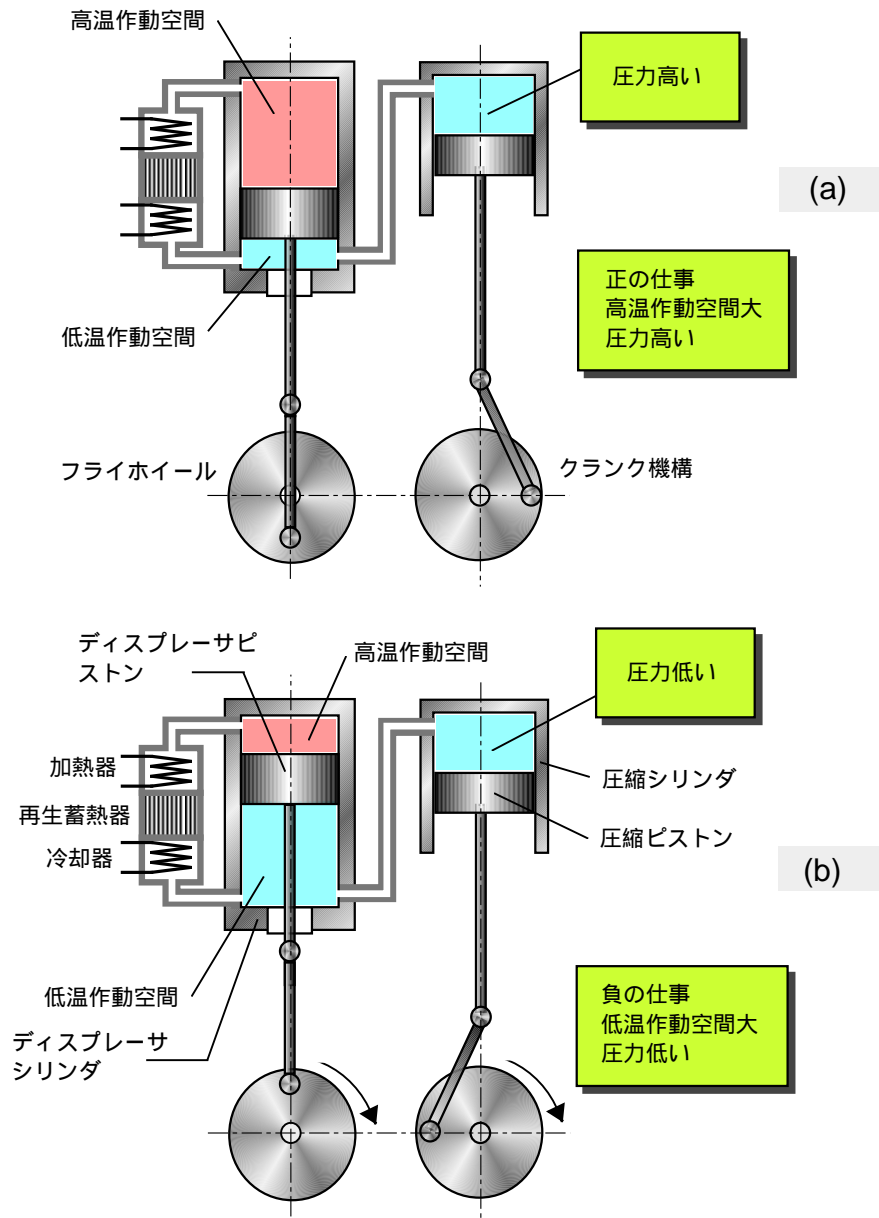


図6 ディスプレサ形エンジンの動作原理

ディスプレサシリンダの容積は一定である
 ディスプレサピストンは熱交換器で、熱的な仕切り板である
 ディスプレサピストンが変位すると内部の圧力も変化する
 熱から仕事への変換はない

ディスプレサ形エンジンにするには

図6にディスプレサ形スターリングエンジンの基本構成図を示します。高温側はディスプレサシリンダと呼ばれる一定容積のシリンダの中にディス

プレサピストンが入っているのが特徴です。前に説明したとおり、ディスプレサシリンダの中でディスプレサピストンが変位すると、シリンダ内部の圧力も変化しますが、出力は得られません。出力を得るには圧縮ピストンが必要になります。

そこで、図6 (a)の右側に示した圧縮シリンダをつなげて考えてみます。基本的には圧縮ピストンが下に向かって変位する過程で、エンジン内部の圧力が高くなるように、また上に向かって変位する過程では圧力が低くなるように、ディスプレサピストンを変位させれば、ディスプレサ形エンジンから出力が得られます。図ではディスプレサピストン

と圧縮ピストンは90度の位相差でクランク軸につながっているため、クランク軸を時計方向に回転させると、圧縮ピストンが下に向かって変位するとき、ディスプレイサシリンダの高温作動空間が大きいので、発生した高い圧力によって圧縮ピストンは正の仕事を行いません。一方、ディスプレイサピストンが上死点にあるとき、ディスプレイサシリンダ容積に占める低温作動空間の割合が大きくなるので、シリンダ内の圧力は低くなります。ディスプレイサピストンが上死点に向かう圧縮過程では内部の圧力が低いので、圧縮に要する負の仕事は小さくて済みます。その結果、1サイクルで得られる仕事は正と負の仕事の絶対値の差ということになります。

● スターリングサイクル ●

理論スターリングサイクルは、2つの等温変化と2つの定容変化という過程で構成されています。図3では膨張及び圧縮過程は等温変化であり、加熱及び冷却過程は定容変化になります。スターリングサイクルを圧力-容積(P-V)線図で示すと図7のようになります。なお、図中に示した記号は図3の記号に対応しています。図7では等温膨張及び圧縮過程において、高温及び低温熱源の温度と作動流体の温度を等しくすれば可逆変化となります。また、作動流体の比熱が温度に関係なく一定とすれば、定容変化である加熱及び冷却過程では、加熱するために必要な熱量と冷却熱量(低温側からの放熱量)とは等しくなければなりません。そこで、冷却過程で低温側から放熱された熱を再生蓄熱器を通して作動流体を加熱するための熱として再び戻すと、スターリングサイクルは全て可逆過程で構成されることになります。

スターリングサイクルは、高い熱効率を示すといわれていますが、それには再生蓄熱器が重要な役割を持っています。理想の熱交換器を用いれば、スターリングサイクルは全て可逆サイクルとなり、その理論効率はカルノーサイクルに一致します。

● 逆スターリングサイクル ●

スターリングサイクルを逆にすると、動力によって低温の熱源が

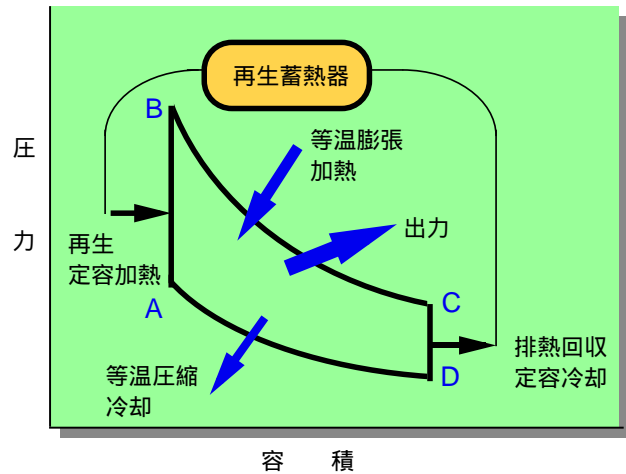


図7 スターリングエンジンの圧力-容積線図

ら高温の熱源に向かって熱を汲み上げることが出来ます。一般には逆スターリングサイクルと呼ばれ、実用的な機械(熱機関)としてはヒートポンプや冷凍機があります。作動流体は一般にヘリウムガスが用いられています。

スターリングサイクル冷凍機(スターリング冷凍機)は、機械的な動力で圧縮ピストンを変位させることによって圧力の変動を発生させています。低温を得るには圧力の周期的な変動に同調して動く膨張ピストンあるいはディスプレイサピストンを必要とします。

図8にスターリング冷凍機の機器構成とそれぞれの機器の内部の温度分布を模式的に示します。膨張ピストンと圧縮ピストンとの位相差は90度程度にと

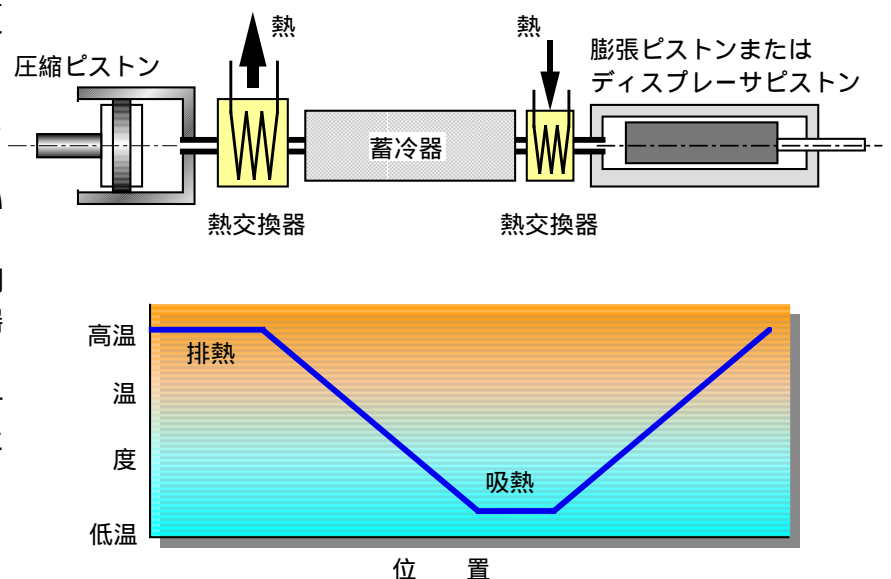


図8 スターリング冷凍機の機器構成と温度分布

ります。膨張ピストン形式では圧縮ピストンの変位による作動流体の仕事が再生蓄熱器（冷凍機では蓄冷器と呼ばれています）で低温部からの熱の汲み上げに消費され、残りの作動流体の仕事が膨張ピストンによって吸収されます。

ヴィルミエサイクル冷凍機（ヴィルミエ冷凍機）は、スターリングエンジンとスターリング冷凍機を組み合わせたもので、作動流体の圧力変動を熱エネルギーによって行なうのが特徴です。したがって、ヴィルミエ冷凍機は作動流体を加熱するための高温部、エンジン及び冷凍機からの排熱を行なうための中温部（一般に室温付近の温度）及び低温熱源から熱を汲み上げるための低温部の3つの温度領域を必要とします。

冷凍機では、蓄冷器の中でいかにして作動流体の仕事熱を熱の輸送に変換するかが重要で、エンジンが熱を動力に変換するのとは異なります。

注意！

- (1) エンジンと冷凍機の説明で用いた「膨張」と「圧縮」という表現の違いに注意して下さい。
- (2) エンジンの低温（一般には室温付近の温度）はスターリング冷凍機では高温と呼んでいます。冷凍機で低温というのは室温より低い温度です。
- (3) 但し、ヴィルミエ冷凍機では高温（エンジンと同じ）、中温（エンジンでは低温で、スターリング冷凍機では高温に相当）と低温（スターリング冷凍機と同じ）と表現しています。

スターリングサイクル
 スターリングエンジン：熱エネルギーを動力に変換
 逆スターリングサイクル
 スターリング冷凍機：動力を熱エネルギーに変換
 ヴィルミエ冷凍機：熱エネルギーを熱エネルギーに変換

● スターリングエンジンの形式 ●

さて、話をスターリングエンジンに戻しましょう。スターリングエンジンの動作原理について、2ピストン形エンジンとディスプレイサ形エンジンで説明しました。ところで、スターリングエンジンはそれを構成する機器の配置によって3つの形式に分類されています。エンジンを構成する機器には加熱器、再生蓄熱

器、冷却器及びピストン（ディスプレイサ）等があります。図9にスターリングエンジンの基本形式を示します。

形エンジン

図9(a)に示した形エンジンは、高温作動空間と低温作動空間の間に加熱器、再生蓄熱器及び冷却器が直列につながっています。この形式のエンジンは、高い圧力比が得られるので、実用的なエンジン形式として採用されています。実際のエンジンは膨張と圧縮の2つのシリンダの中にそれぞれピストンが入っています（2ピストン形エンジン）。今回製作する模型エンジンはこの形式です。

形エンジン

図9(b)に示した形エンジンはディスプレイサピストンとピストンが1つのシリンダの中にあるので、ディスプレイサピストンと圧縮ピストンが位相差をもって変位するとき、重なり合う作動空間を作ることが出来るので、作動空間を有効に使えることとなります。したがって、エンジンの小型化が図れるので、実用的なエンジン形式として採用されています。

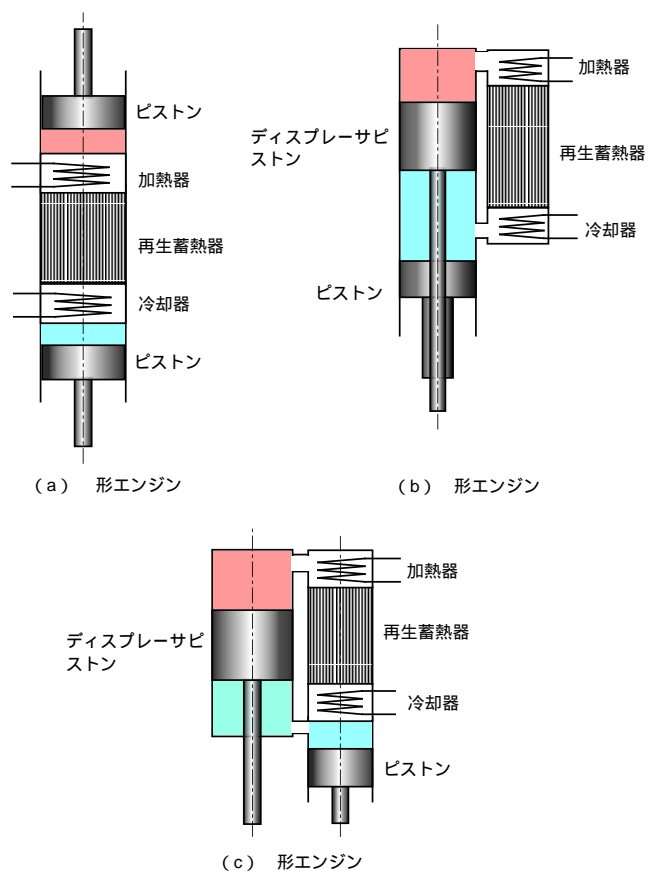


図9 スターリングエンジンの基本形式

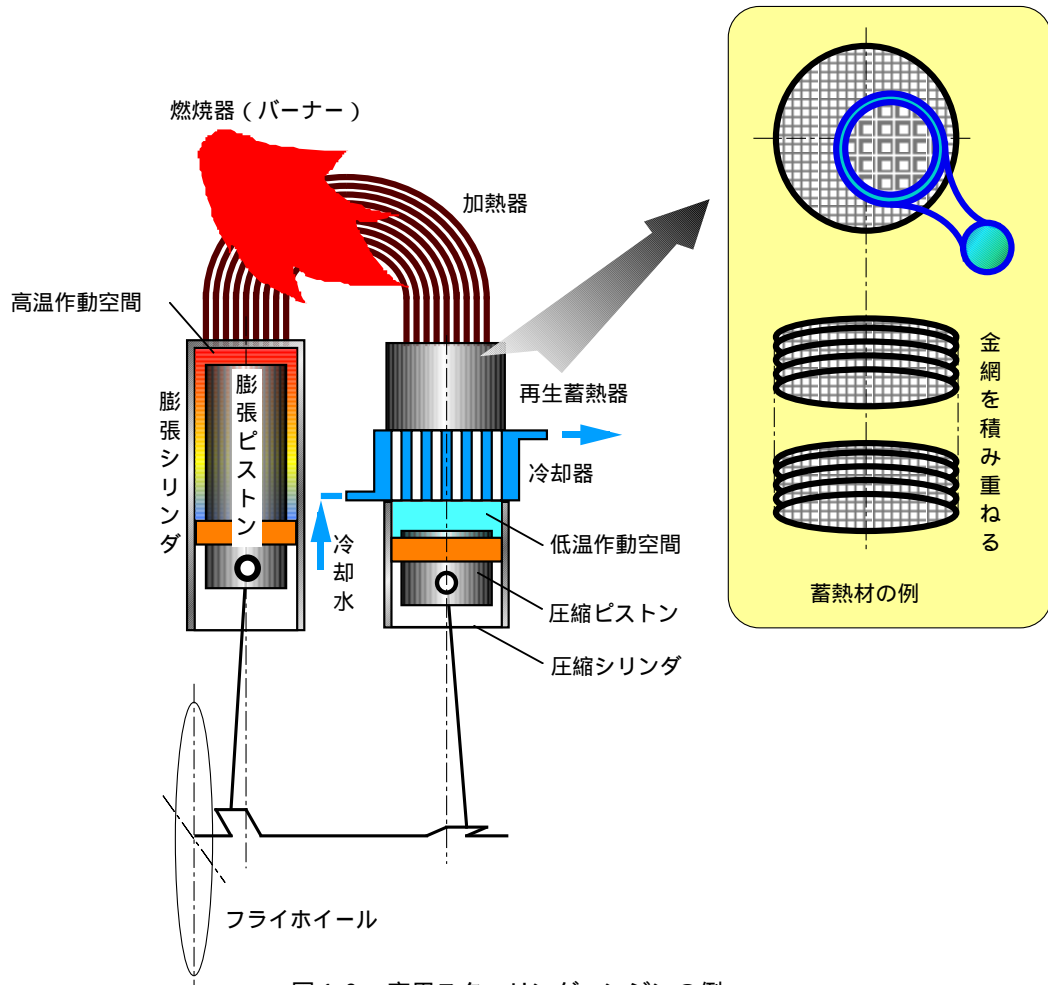


図10 実用スターリングエンジンの例

形エンジン

図9(c)に示した形エンジンは高温(膨張)シリンダの中にディスプレイサピストンが圧縮シリンダにはピストンが別々に中に入っています。この形式のエンジンの特徴は、ディスプレイサとシリンダとのシールが容易なこと、高温及び低温の伝熱面を色々工夫できることです。そのために、低温度差で動作するエンジン(低温度差形スターリングエンジン)に採用されています。

● 実用エンジンとその主要機器 ●

これまで示した図からスターリングエンジンには加熱器、再生蓄熱器及び冷却器が必要な機器であることが分かったと思います。たしかに実用エンジンにおいて、それぞれの性能が十分でないとは高性能のスターリングエンジンを実現することは出来ません。図9(a)に示した形エンジンをもう少し詳しく示すと、図10のようになります。図11には実用エンジンの開発例として2ピストン形及びディスプレイサ

形エンジンを示します。以下では主要機器である加熱器、再生蓄熱器及び冷却器の特徴を簡単に説明します。

加熱器は温度が900 あるいはそれ以上の温度になるので、高温で高圧に耐えられる「耐熱材料」が用いられています。加熱器は作動流体を十分な温度まで加熱するために、沢山の細いパイプで出来ています。それでも作動流体の温度はパイプの温度よりも100から200 低くなってしまいます。

再生蓄熱器はその中を流れる作動流体の温度を、高温あるいは低温作動空間の温度に等しくするために用いるものです。作動流体が低温から高温作動空間に向かって再生蓄熱器の中を流れる間について考えてみます。作動流体は再生蓄熱器入り口では蓄熱材の温度より低いので、蓄熱材から熱を受け取りながら温度が上昇し、そこを出る時には高温になります。もし、再生蓄熱器の性能が悪いと作動流体の温度が低いまま加熱器に入ってしまうので、高温まで加熱するには沢山のエネルギーが必要となります。次に

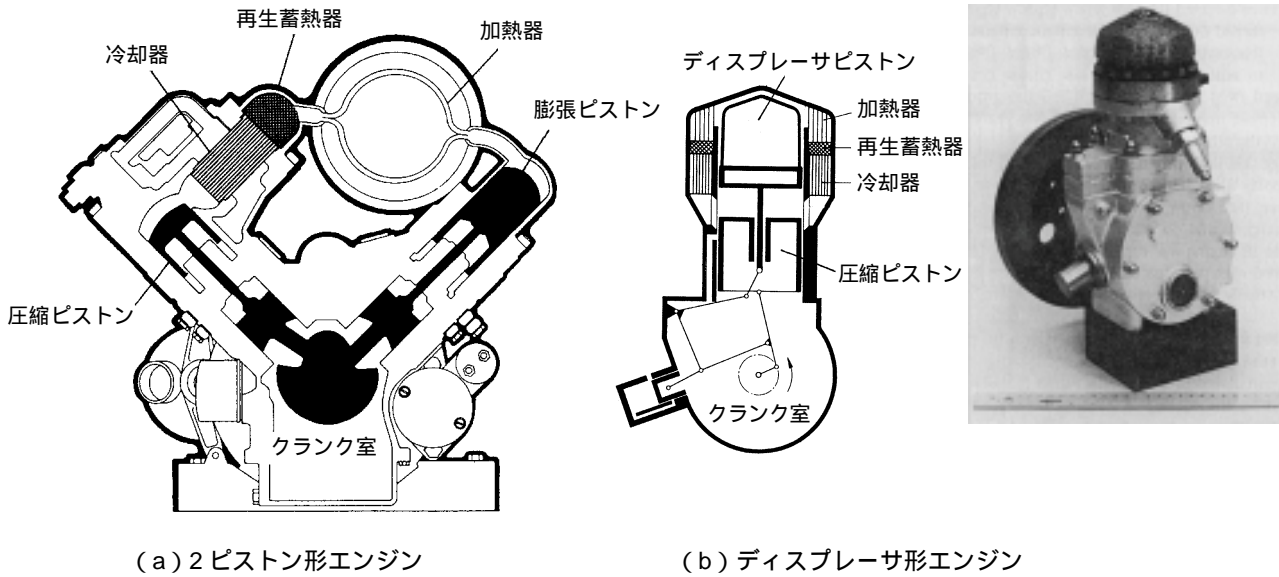


図 1 1 実用スターリングエンジンの例

作動流体が高温から低温作動空間に向かって再生蓄熱器の中を流れる間について考えてみます。高温作動空間にある作動流体は蓄熱材の温度に比較して高いので、蓄熱材に熱を与えながら温度が降下し、再生蓄熱器を出る時には低温になります。

蓄熱材には高温にも耐えられる材料が用いられ、一般にはステンレス鋼のメッシュ(金網)が使われ、それを重ねて再生蓄熱器にしています。

冷却器は自動車のラジエタと同じで、スターリングエンジンから放熱して低温を保つために必要な機器です。冷却器はフィンから直接大気中に放熱(排熱)したり、冷却水を流して冷却します。冷却器の近くにはピストンとシリンダの間から作動流体が洩れないようにシールを設けています。シール部の温度が高くなるとシール材の摩耗が大きくなるので、エンジンの性能も低下することになります。

良好なエネルギー変換とその伝達方法
シリンダやピストンの熱損失を小さくする
再生蓄熱器内部の圧力損失を小さくする
軸受やシール部の摩擦損失を小さくする

● 模型スターリングエンジン ●

実用的なスターリングエンジンは、高い信頼性と性能が要求されているので、複雑な構造になっています。スターリングエンジンの模型を作る場合、複雑

な構造をどこまで簡素化できるかが重要です。当然、模型でも加熱器、再生蓄熱器及び冷却器があり、動力を取り出す機構も必要です。

模型スターリングエンジンの構造

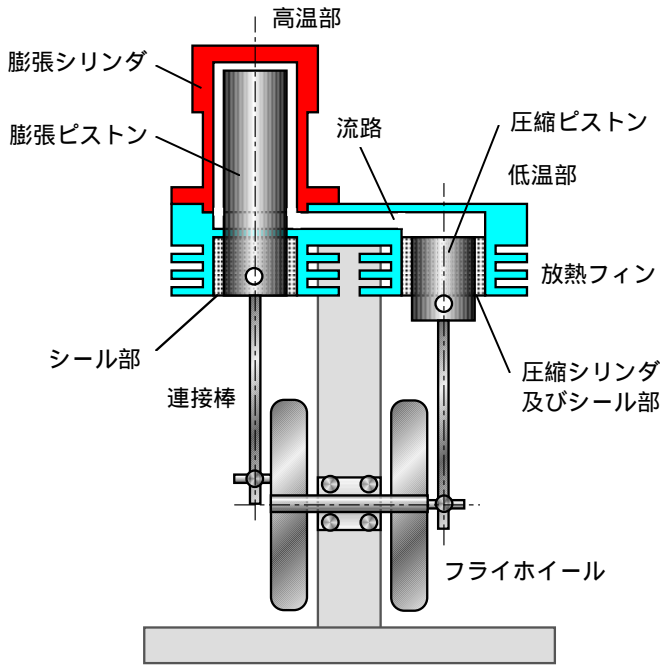
サイエンスキャンプ'98では図 1 2 に示す 形エンジン(2ピストン形エンジン)を作ることにしました。この形式は部品数が少なく、組み立ても比較的簡単なことが特徴です。実際に上手く作って運転してみると、毎分数千回転の高速回転が得られます。

模型スターリングエンジンは作動流体に空気を用い、圧力は大気圧で運転するものです。膨張シリンダは高温になるので、ステンレス鋼で作っています。その他は軽くすることと放熱のことを考えてアルミ合金で出来ています。

ピストンとシールには市販のガラス製の注射器の内筒と外筒を組み合わせて使っています。内筒(ピストン)と外筒(シール)とのすきまが狭いと動きが悪くなり、ゆるすぎてもダメです。模型エンジンでは作動流体がピストンを押す力が小さいので、抵抗が大きいと動きが悪くなります。そこで、摩擦損失を出来るだけ小さくするために、小型の玉軸受を使っています(図中 印で示しています)。同図(b)に製作した模型スターリングエンジンの写真を示します。

模型では高温作動空間、加熱器、再生蓄熱器はどこにある？

図 13 に膨張シリンダの部分を示します。模型では



(a) 模型エンジンの構造概略図



(b) 模型エンジンの外観写真

図 1 2 模型スターリングエンジン

膨張シリンダの高温作動空間の部分を加熱器にしています。この部分のシリンダをガスバーナーであぶって高温作動空間にある空気を加熱します。空気の温度は図に示したとおり、シリンダ外側の加熱温度より低くなります。この温度差を小さくしたいのですが、そうすると熱は高温側から低温側へ向かっ

て流れてしまいます(熱損失となります)。模型では熱損失をなるべく少なくするために、シリンダの厚みを小さくしています。

模型エンジンでは実用的なエンジンのような再生蓄熱器はついていません。再生蓄熱器としての作用は薄い肉厚のシリンダと膨張ピストンとのすきまを

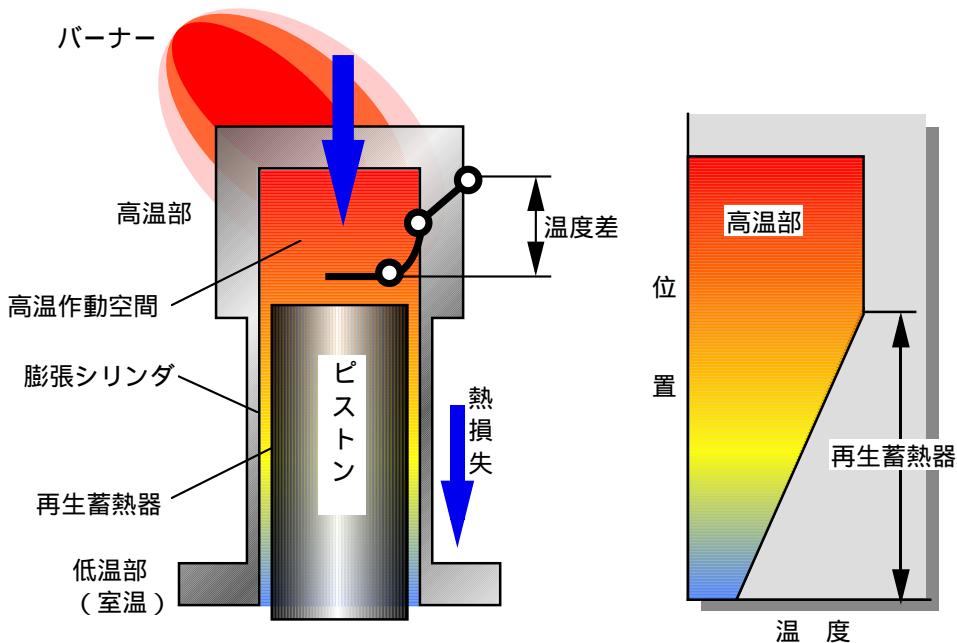


図 1 3 膨張シリンダ部分とその温度分布

利用して、空気そのものを蓄熱材として使います。このような考えは実用的な冷凍機で採用されています。

● エンジンを作ってみますか？

スターリングエンジンの入門書よりもっと簡単に、エンジンの動作原理について説明しました。サイエンスキャンプ'98ではこの他に「工作機械の使い方」や「設計図」をまとめて、テキストにしました。サイエンスキャンプ'98では、6名の高校生達が模型エンジンの製作に取り組みました。そして全てのエンジンが動きました。皆さんも模型エンジンを作ってみませんか？

● スターリングエンジンに興味を持った人のための参考書●

スターリングエンジンの模型を作っただけでは意味がないので、エンジンの動作原理や構造とその特徴について簡単に解説しました。最後に、スターリングエンジンに興味を持たれ、さらに詳しいことが知りたい人のため、参考書を紹介しておきます。

入門書

1. 岩本昭一監修、模型スターリングエンジン、山海堂、平成9年
2. James G. Rizzo, Modelling Stirling and Hot Air Engines, Patrick Stephens, 1985
3. Andy Ross, Stirling Cycle Engines, Solar Engines, 1981
4. Ivo Kolin, Stirling Motor, Zagreb University Publications Ltd., 1991

専門書

1. C.M.Hargreaves, The Philips Stirling Engine, Elsevier, 1991
2. G.T.Reader and C.Hooper, Stirling Engines, E. & F.N. Spon, 1983