マイクロスターリングエンジン

中 島 尚 正*

1. 夢のエンジン

スターリングエンジン (Stirling engine) は、1816 年に、スコットランドの牧師 Robert Stirling によって発明された。発明の動機は、ボイラの爆発事故の絶えなかった当時の蒸気機関を、安全な機関に替えるためだった。発明の直後は陽の目を見かけたが、その後はまもなくガソリンエンジンが発明されたために長い間姿を消していた。

スターリングエンジンの作動原理はガソリンエンジンに代表される内燃機関とは全く異なる。スターリングエンジンは作動ガスと呼んでいる空気やヘリウムなどの気体をシリンダー内部に常に閉じ込めている。そして、外部からこの作動ガスを加熱・冷却することにより、作動ガスの圧力を上昇・下降させて、ピストンを駆動して動力を発生する。したがって、内燃機関ではなく外燃機関である。

スターリングエンジンの特長は、理論上の熱効率がすべての熱機関の中で最高であり、燃料や熱源は何でもよく、運転が静かなことである。発明後、170 年余経った現在もまだ商品化に成功していないが、卓越したその潜在的な可能性から夢のエンジンと言われている。

2. 多様な用途

スターリングエンジンは逆にモーターなどで回してやるとヒートポンプやクライオクーラ（極低温冷凍機）の働きをする。スターリングエンジン式のクライオクーラはヘリウムを液化するのに使われている。

スターリングエンジンをマイクロ化したマイクロアクチュエータはマイクロロボットや人工臓器の動力として可能性がある。この利点は、熱源が利用できれば、あるいは温度差が利用できれば、電池を必要としないことである。また、マイクロ化したヒートポンプには IC チップに組み込んで超電導素子を局所冷却すること等の利用

も考えられる。

さて、これまで発表された完成度の高い小型スターリングエンジンの例としては、米国のワシントン大学のグループが人工心臓用に開発したものが有名である。その出力は約 5 W、全体的積は約 700 cm³ である¹⁾。一方、クライオクーラの例としては米国 Hughes Aircraft 社の直径約 5 cm、長さ約 14 cm のものがある²⁾。マイクロ化の試作研究例としては、筆者らが試作したピストンの掃過容積が約 0.05 cc のスターリングエンジンが現在のところ最小である³⁾。

3. スターリングエンジンの動作原理

スターリングエンジンの動作原理をまず図 1 を使って簡単に説明する。同図の機構はピストン、ディスプレーサ、側部でつながっている 2 本のシリンダから成っている。シリンダ内部は作動ガスで満たされている。ディスプレーサはスターリングエンジン特有のものであって、シリンダとの間には気体が自由に通過できる隙間がある。ピストンの働きは内燃機関の場合と同じように、気体を閉じ込めて圧縮・膨張させることである。

ディスプレーサ側のシリンダの上部は冷やし、下部は熱しておく。すると、ディスプレーサを上下に動かすことによって、内部の気体の圧力を変えることができる。なぜならば、ディスプレーサを上げると中の気体は下方に移って加熱されるので、外気より圧力は上がる。その結果、ピストンは上方に動く。反対に、ディスプレーサを下げると、気体は上方に移り冷やされるので、外気より圧力は下がる。その結果、ピストンは下方に動く。

往復動アクチュエータ

ディスプレーサは圧力のバランスが取れているのでごく僅かな力で動かすことができる。つまりピストン出力にかんして増力機構になっているのである。したがって、ディスプレーサを何らかの手段で動かしてやれば、ピストンの動きを油圧シリンダのようなアクチュエータとして利用することができる。

エンジン

図 2 に示すようにピストンとディスプレーサをそれぞ

原稿受付 1990 年 5 月 30 日

Micro Stirling Engine

* 東大工学部機械工学科

図 1 ピストンとディスプレーサ

図 2 スターリングエンジンの基本構成

図 3 試作マイクロスターリングエンジン

れロッドを介してはずみ車のついたクランク機構につながると、ピストンとディスプレーサの動きを回転運動として取り出すことができる。これが、エンジンとしての作動原理である。この場合、ピストンとディスプレーサは、約 1/4 周期分の位相差を与えておく。また、ディスプレーサ外周部には熱交換器（再生器）を設けて、気体の通過に伴って熱がムダに流れないようにする。

熱源としては、燃料の燃焼熱のほかに、太陽熱、フッ化リチウムの気化熱や塩化物の融解熱、アイソトープの崩壊熱等も利用可能である。内部の気体は、ヘリウム、水素、空気が使われている。

冷凍機

ディスプレーサ側シリンダーの下部の加熱を止めて、クランク軸をモーターなどで回してやると、ディスプレーサ側シリンダーの下部は熱を奪われて温度が下がる。これが、冷凍機の働きである。

4. スケール解析

サイズを小さくしていくと、スターリングエンジンの性能に関係する様々な物理現象の影響度が変化し、その結果、従来の設計原理がそのままでは適用できなくなる。このような問題を明らかにするためには、スケール解析が

有効である³⁾。ここでいうスケール解析とは、作動ガスの平均圧力や温度分布は変えないで、エンジン各部を ϵ 倍に比例縮小したときに、エンジンに影響する摩擦力、慣性力、応力、伝熱等がどのような傾向を示すか明らかにすることである。

スケール解析から導かれる主な設計指針、すなわち、サイズを小さくしたときの設計上の留意点、を取り上げてみると次のようになる。

④ はずみ車の効果が低減するので、クランク・はずみ車機構に変わる機構でピストンとディスプレーサ間の位相差を保つ必要がある

⑤ 気体等のバネ効果を利用する機構の場合は固有振動数を下げる工夫が必要

⑥ 表面積／容積比が大きくなるのでシリンダー壁面から内部への伝熱は容易になる一方で、シリンダー壁内の伝導により熱が逃げ易くなる。したがって、伝熱より断熱の設計が重要

⑦ しゅう動部の摩擦力／慣性力比が大きくなり、漏れ量も増えるので、しゅう動機構はできるだけ避ける

⑧ 慣性力の影響が小さくなるので、ピストンやディスプレーサの運動は滑らかである必要はない。すなわち、断続的なギクシャクした動きも許されるのである

5. 試作マイクロスターリングエンジン

図3に示すものが自立運転に成功した試作エンジンである³⁾。最大外径は約2センチ、全長は約5センチであり、内燃機関の排気量に相当するピストンの掃過容積は、 0.05 cm^3 である。

このエンジンは図3のディスプレイサの加熱壁(1)を加熱し、冷却壁(2)を冷却して作動させる。図からも明らかなように、このエンジンははずみ車やクランク軸は使っていない。この形式のエンジンはフリーピストン型と呼ばれている。出力は、ピストンロッド(3)の往復動を、直接、負荷に伝えて取り出す。例えば、リニア式の発電機を駆動するときは、マグネットをこの機関のピストンロッドを介して往復動させるのである。

このフリーピストン型は、構造が簡単であることから、マイクロ化に適しているが、反面、マイクロ化すると振動数が高くなり過ぎるという問題がある。それは、系の固有振動数とサイズの間に反比例の関係が成り立つためである。振動数が高くなり過ぎて困ることは、伝熱の時間が不足して作動ガスの加熱・冷却が十分に行なわれなくなることである。図3の試作エンジンでは、マグネットを利用して振動数を下げた。

加熱壁を電気ヒータで100度に、冷却壁を氷で0度に保った時のエンジンの出力は、約10mWであった。

6. ピストン・シリンダ機構を超えるには

現状の試作エンジンのサイズをさらにマイクロ化して、一辺が数ミリの立方体に収まる大きさにしようとしたときに、まず、当面する問題はピストンとシリンダの摩擦である。マイクロ化すると、相対的にピストンとシリンダ間の摩擦が無視できなくなる程大きくなるので、これを無摺動の機構に変える必要がある。代替手段としては、ペローズやダイアフラムが考えられるが、色々な問題がある。ペローズの場合の大きな問題は、押し縮めても中のガスが残ってしまうことである。ダイアフラムについ

ては、容積変化が十分取れないことが問題である。このように見ていくと、改めてピストン・シリンダ機構の優れていることに感心させられる。

7. アクチュエータとしての可能性

マイクロスターリングエンジンの特長の1つは、比出力(出力/重量)が大きいことである。現状の試作エンジンの比出力は約1W/kgであるが、作動流体の圧力や温度差等を高めると比出力を2桁高くすることができる。このようなマイクロスターリングエンジンを形状記憶金属のアクチュエータと比較すると、比出力はやや劣るが、熱効率率は1桁上である。

マイクロスターリングエンジンは、決して、万能なアクチュエータではない。が、モータにない特性を持っていることは注目してよいだろう。

参 考 文 献

- 1) M. A. White : Proc. of 18th International Energy Conversion Engineering Conference, pp. 694-701, 1983.
- 2) Walker, G and Fauvel R : Proc. of 3rd International Stirling Engine Conference (Rome), paper No. 51, 1986.
- 3) N. Nakajima, K. Ogawa and I. Fujimasa, "Study on Micro Engines—Miniaturizing Stirling Engines for Actuators", SENSOR AND ACTUATORS, Vol. 20, No. 1/2, pp. 75-82, 1989.
- 4) 生田 : 精密工学会誌, Vol. 54, No. 9, pp. 1656-1661, 1988.

中島尚正

(Naomasa NAKAJIMA)

昭和16年3月9日生。昭和39年東京大学工学部機械工学科卒業。44年同大学院博士課程修了。工学博士。東京大学工学部機械工学科で、機械設計、CAD/CAM等の講義演習を受け持ち、インテリジェントCAD、マイクロマシン、福祉機器、設計工学やシステム工学分野の研究に従事。現在、教授。東大工学部マイクロマシン・ラボ世話人。