

実験用セミフリーピストン形スターリングエンジンの性能特性

船舶技術研究所 ○平田 宏一

1. まえがき

スターリングエンジンは高効率性、低公害性、燃料の多様性といった優れた特徴を有する外燃機関である。スターリングエンジンにはセミフリーピストン形と呼ばれる形式があり、それはディスプレイサとパワーピストンとを機械的に連結せずにパワーピストンの往復運動を直接動力として利用できるという特徴がある。一方、近年になって、魚の泳法を模倣した水中推進装置の研究開発が活発に行われている¹⁾。著者らも、尾ひれを左右に往復運動させて推進する海中ロボット（魚ロボット）に関する研究を進めており²⁾、その動力源としてセミフリーピストン形スターリングエンジンの適用を提案している³⁾。

本報では、セミフリーピストン形スターリングエンジンの設計手法や運動制御手法の確立を目的としたシミュレーションモデルを開発し、その計算結果と実験用エンジンによる実験結果とを比較・検討した。

2. セミフリーピストン形スターリングエンジン

従来より、セミフリーピストン形スターリングエンジンの開発は活発に行われており、特に宇宙用発電システムの動力源として活発な研究開発が進められてきた⁴⁾。それはピストンの往復運動でリニア発電機を駆動し、電気エネルギーを得るものであり、本研究で提案するように、往復運動を直接動力として利用するものではない。

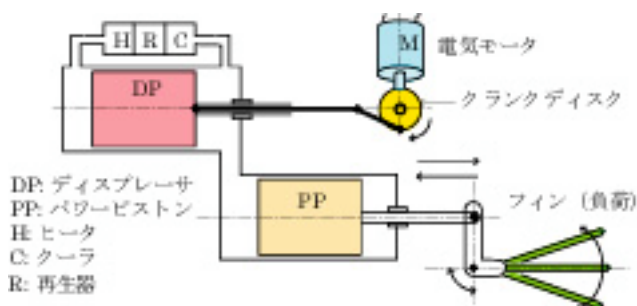


図1 セミフリーピストン形スターリングエンジンの基本構造

2.1 セミフリーピストン形スターリングエンジン

図1は本研究で対象としているセミフリーピストン形スターリングエンジンの基本構造を示している。これは、ディスプレイサを電気モータで駆動することで生じる圧力変化によって、パワーピストンが一自由度振動系を構成して往復運動するため、ピストンの往復運動を直接動力として利用できるという特徴がある。圧力変化の周波数が振動系の共振周波数と一致した場合、パワーピストンのストロークが増大するとともに、両ピストンに適切な位相差が生じ、一般のスターリングエンジンと同様の熱サイクルを構成する。なお、ディスプレイサの両端の圧力差は小さいため、ディスプレイサを駆動する電気モータの消費エネルギーは極めて小さくてすむ。

2.2 魚ロボットへの応用

スターリングエンジンは海中動力源としての研究開発が活発に行われてきた⁵⁾。それは、高エネルギー密度の熱源を用いることで長時間の航行が可能となること、熱源に燃焼ガスを使用した場合でも、連続的な高圧燃焼が可能のため、海中への排気ガスの放出が比較的容易であること等の利点を有するためである。

現在、船舶や海中ロボットの推進装置に用いられているスクルーは回転運動を利用しているが、尾ひれを左右に振動させる魚ロボットの推進は往復運動を利用している点が大きく異なる。一般の回転式エンジンはピストンの往復運動をクランク機構により回転運動へ変換している。そのため、回転式エンジンを魚ロボットに適用する場合、回転運動を再度往復運動へと変換する必要がある。一方、セミフリーピストン形スターリングエンジンは、ピストンの往復運動を直接尾部の往復運動に利用できるため、クランク機構や出力伝達部での機械損失を大幅に低減できる可能性がある。

3. シミュレーションモデル

図2にセミフリーピストン形スターリングエンジンのシミュレーションモデルを示す。作動空間を膨張空間、再生器空間、圧縮空間及びパワーピストン空間の4つに分割し、熱交換器での圧力損

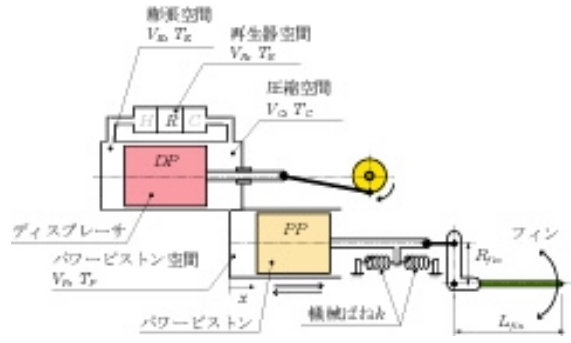


図2 シミュレーションモデル

失は考慮しない。したがって、ディスプレイサの運動が正弦状であると仮定した場合、エンジン内ガス圧力 P は、一般のスターリングエンジンに用いられる等温モデル⁹⁾により式(1)～式(4)で求められる。

$$V_E = \frac{V_{SC}}{2}(1 - \cos 2\pi ft) + V_{DE} \quad (1)$$

$$V_C = \frac{V_{SC}}{2}(1 + \cos 2\pi ft) + V_{DC} \quad (2)$$

$$V_P = A_p x \quad (3)$$

$$P = \frac{M_0 R}{\frac{V_E}{T_E} + \frac{V_R}{T_R} + \frac{V_C}{T_C} + \frac{V_P}{T_P}} \quad (4)$$

ここで、 V 及び T はそれぞれ容積及びガス温度であり、添字の E , R , C , P はそれぞれ膨張空間、再生器空間、圧縮空間及びパワーピストン空間を表している。また、 V_{SE} はディスプレイサの行程容積、 V_{DE} 及び V_{DC} は膨張空間及び圧縮空間の無効容積、 f は周波数、 M_0 は全封入ガス質量、 R はガス定数である。

図2に示すように、パワーピストンのロッドには2本の機械ばね(ばね定数 k)が取り付けられている。さらにクランクアーム長さが R_{fin} のリンク機構を介して平板状のフィン(長さ L_{fin} , 面積 S)を取り付け、それを水中で運動させることで負荷 F_{fin} を与える。したがって、パワーピストンの運動方程式は次式で表される。

$$m \frac{d^2 x}{dt^2} = F_P - F_{fin} - 2k(x - x_s) \quad (5)$$

ここで m はパワーピストン往復部質量 m_p とフィンの等価質量 m_{fin} との総和、 x はパワーピストンの変位、 t は時間、 x_s はばねの中立位置である。

パワーピストン両端の圧力差による外力 F_p は、

パワーピストンの断面積 A_p 、エンジン内ガス圧力 P 及びパワーピストンの背圧(大気圧) P_B を用いて次式で表される。

$$F_p = A_p(P - P_B) \quad (6)$$

式(5)において、 F_{fin} はフィンを水中で運動させることによって生じる負荷であり、平板の抗力として次式で求められる。

$$F_{fin} = C_D \frac{1}{2} \rho |v_{fin}| v_{fin} S \quad (7)$$

$$v_{fin} \approx \frac{L_{fin}}{2R_{fin}} \frac{dx}{dt} \quad (8)$$

ここで、 C_D は抵抗係数であり、以下の計算では $C_D=1.1$ とした。 ρ は水の密度、 v_{fin} はフィン中央部の速度である。

式(5)～式(8)は、係数 c を用いて次式で表される。

$$m \frac{dy}{dt} = A_p(P - P_B) - c' y^2 - 2k(x - x_s) \quad (9)$$

$$y = \frac{dx}{dt} \quad (10)$$

ただし、

$$c' = \frac{1}{8} C_D \rho S \left(\frac{L_{fin}}{R_{fin}} \right)^2 \quad (11)$$

式(9)及び式(10)をルンゲ・クッタ法を用いて解くことで、ディスプレイサの運動に対するパワーピストンの変位 x の時間的变化が求められる。

4. 実験用セミフリーピストン形エンジンの構造

パワーピストンの往復運動から直接動力を取り出す場合の動作を確認し、魚ロボットへの適用性を検討するため、実験用エンジンの設計・試作を行い、様々な運転パラメータがエンジン特性の及ぼす影響を測定した。図3に実験用エンジンの構造、表1に主なエンジン仕様を示す。ディスプレイサとシリンダの間には1 mmの隙間があり、再生器を省略した簡単な構造とした。ガス漏れの影響及び摩擦の影響を極力抑えるため、パワーピストンにはガラス製の注射器を流用した。

パワーピストンのロッドには2本の機械ばねが取り付けられており、運転時にはパワーピストン端部にリンク機構を介してアルミニウム合金製のフィン(厚さ3 mm)を取り付け、それを水中で往復運動させることで負荷を与えた。

5. 実験方法及び実験条件

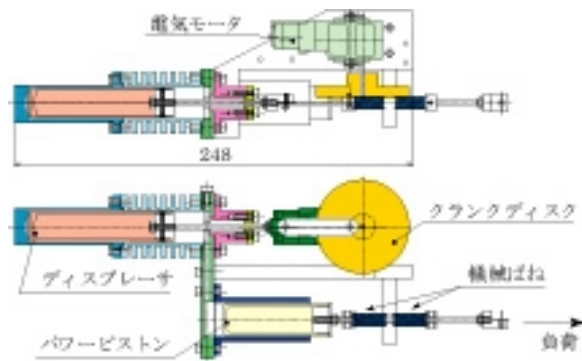


図3 実験用エンジンの構造

表1 エンジン仕様

ディスプレーサ ピストン径 ストローク	18 mm 16 mm
パワーピストン ピストン径 ストローク 往復部質量	20mm ~20 mm 46.6 g
周波数	0~12 Hz
平均圧力	101.3 kPa (大気圧)
加熱形式	電熱線
冷却形式	空冷 (自然放熱)

5.1 実験装置系統

図4に実験装置系統を示す。ディスプレーサの上死点信号及び回転角はフォトマイクロセンサにより検知され、パワーピストンの変位はレーザ式変位センサを用いて測定される。また、ガス温度はK熱電対を用いて膨張空間、圧縮空間及びパワーピストン空間の3箇所、パワーピストン空間の作動ガス圧力はひずみゲージ式圧力センサを用いて測定される。

5.2 実験条件

表2に実験条件を示す。実験に使用した機械ばね及びフィンはいずれも3種類である。これらのばね定数 k 及びフィンの長さ L_{fin} を変化させることによって振動系の特性を調整できる。また、加熱源には電熱線を使用し、膨張空間ガス温度 T_E が600℃になるように入熱量を調整した。

表2 実験条件

機械ばね ばね定数 k	80.2 N/m, 210.8 N/m, 340.4 N/m
フィン 高さ×長さ (等価質量 m_{fin})	50×50 mm (28.2 g), 50×75 mm (63.5 g), 50×100 mm (112.9 g)
膨張空間ガス温度 T_E	600℃

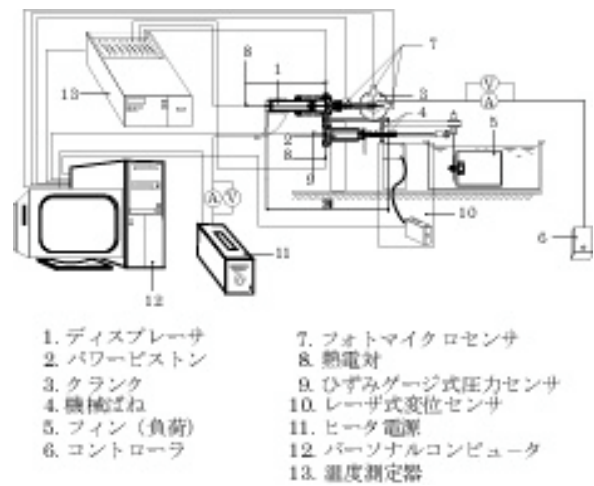


図4 実験装置系統

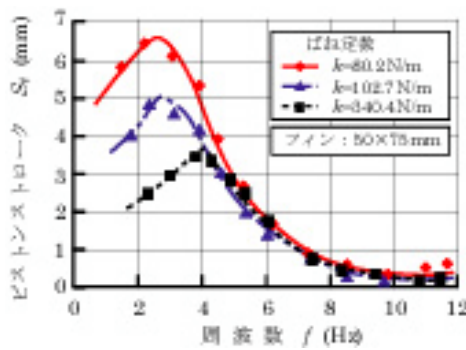
6. 実験用エンジンの性能特性

6.1 ばね定数の影響

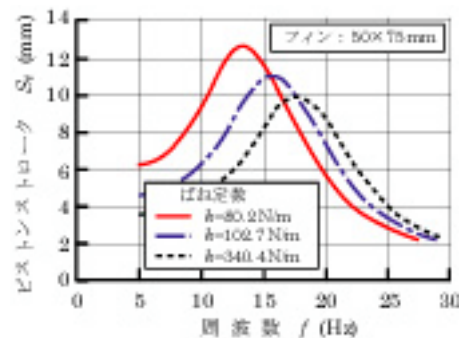
図5は、ばね定数 k をパラメータとした場合の周波数 f に対するパワーピストンのストローク S_i の実験結果及び計算結果を示している。これより、パワーピストンの運動には共振点が存在し、ばね定数 k が大きくなるに従って、共振周波数が高くなり、ストローク S_i が減少していることがわかる。また、計算結果の傾向は実験結果によく一致しているが、ストロークの最大値は実験結果の約2倍、共振周波数は実験結果の約3~4倍程度となり大幅に異なっている。これはフィン周囲の流れの影響が大きいためであると考えられる。式(7)は平板を流体中で一定速度で運動させた場合の荷重を表しており、本実験におけるフィンのように往復運動をさせた場合には、渦の発生等によって大きく異なる可能性がある。また、実際の魚ロボットに適用した場合には、周囲の流れが大きく異なると考えられるため、負荷の与え方についてはさらに詳細な検討が必要である。

6.2 フィン寸法の影響

図6は、フィンの寸法をパラメータとした場合の周波数 f に対するパワーピストンのストローク S_i の計算結果及び実験結果を示している。フィンの寸法を変化させることによってフィンの等価質量 m_{fin} が変化するため、これは式(5)における負荷 F_{fin} と質量 m を変化させたことになる。これより、フィン寸法を大きくするに従って、共振周波数は低下し、ストロークの最大値が減少していることがわかる。また、図5と同様、実験結果と計算結果とは定性的な傾向は一致しているが、定量的には全く異なっている。

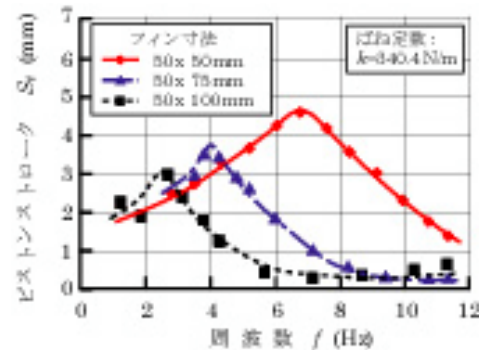


(a) 実験結果

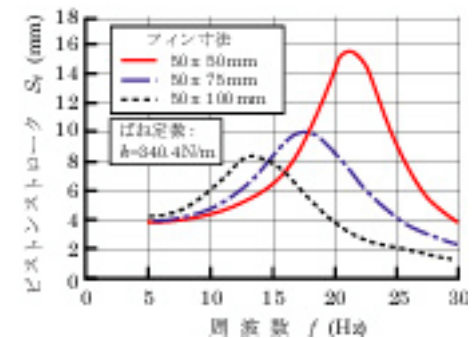


(b) 計算結果

図5 ばね定数の影響



(a) 実験結果



(b) 計算結果

図6 フィン寸法の影響

7. あとがき

以上、セミフリーピストン形スターリングエンジンの基本特性を把握するため、シミュレーション計算並びに実験用エンジンによる動作確認を行った。その結果、本報のシミュレーション計算は実験用エンジンの定性的な傾向を模擬できることが確認された。しかし、フィンにおける負荷の与え方が適切でないため、定量的な特性は大幅に異なっていることがわかった。今後、実験的な検討によって負荷についての詳細な検討を進める予定である。そして、高精度なシミュレーションが開発できれば、高度なエンジン設計や運動制御に貢献するものと考えている。

一方、魚を模擬した推進方法は、高い推進効率を達成しようと言われているが、従来の回転式モータあるいはエンジンを利用する場合、回転運動を再度往復運動に変換する必要がある、そこでの損失を考慮すると推進システムとしての効率が大幅に低下する可能性がある。上述の通り、ピストンの往復運動を直接動力として利用できるセミフリーピストン形スターリングエンジンが適用できれば、高性能な推進システムの開発が可能であると考えている。ただし、エンジンを低い周波数で運転させることに起因するエンジンの大型化や使

用する熱源の問題等、多くの課題が残されており、それらを解決しうる新しい技術が必要不可欠である。

参考文献

- (1) 永井實, イルカに学ぶ流体力学, オーム社, 1998.
- (2) 平田宏一, 小型魚ロボットの設計・試作, 日本設計工学会平成 11 年度春期研究発表講演会講演論文集, No.99—春季, p.29-32, 1999.
- (3) 平田宏一, 植木原明, 山下巖, 魚ロボットに用いるセミフリーピストン形スターリングエンジン, 日本機械学会第3回スターリングサイクルシンポジウム講演論文集, p.78-79, 1999.
- (4) Hoshino, T. et al.: Performance Evaluations of Space-Based Stirling Engine - NALSEM 500, 8th International Stirling Engine Conference, 1997, 133-138.
- (5) Tsukahara, S. et al.: Stirling Power System for Underwater Application, 6th International Stirling Engine Conference, p. 421-426, 1993.
- (6) 山下巖, 濱口和洋, 香川澄, 平田宏一, 百瀬豊, スターリングエンジンの理論と設計, 山海堂, p.37-47, 1999.