A08 魚ロボット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

Performance of a Semi Free Piston Stirling Engine for a Fish Robot

○正 平田 宏一 (海技研)

Koichi HIRATA, National Maritime Research Institute, Shinkawa 6-38-1, Mitaka, Tokyo

We have taken much interest in the highly efficient propulsion of fish and attempt to apply the mechanism of fish-like swimming to the underwater robot. The author examined to adopt a semi-free-piston Stirling engine (SFPSE) for the power source of a fish robot. One of characteristics of the SFPSE is that the output power can be obtained directly from the reciprocating motion of a power piston. In the case of a fish robot, it is the best way that the reciprocating piston drives the oscillating tail fin directly. A great deal of mechanical frictional loss can thus be reduced. This mechanism should result in high potential for efficiency. In this paper, the performance of a simple experimental SFPSE - tail fin system was examined experimentally. Also swimming speed of a fish-like mechanism with the engine was discussed.

Key words: Stirling Engine, Fish Robot, Underwater Vehicle, Thermal Actuator

1. まえがき

著者らは、魚の泳法を模擬した海中ロボット（魚ロボット）の推進動力源として、セミフリーピストン形スターリングエンジンの適用を検討している⁽¹⁾。それはパワーピストンの往復運動を魚ロボットの尾ひれの往復運動に直接利用できるため、機械効率の点で有利であると考えたためである。現在までに、実験用小型エンジン並びにそれを搭載した模型ボートを開発してきた⁽²⁾。本報では、実験用小型エンジンにパワーピストンのストロークや作動ガス圧力、温度等を測定する装置を取り付け、本エンジンの基本性能を測定する。さらに、別途開発を進めている電気モータを用いた魚ロボットの実験結果⁽³⁾に基づき、本エンジンを魚ロボットに利用した場合の遊泳速度について検討する。

2. 実験用セミフリーピストン形スターリングエンジン

図1に実験用エンジンの構造、表1に主な仕様を示す。熱交換器並びにディスペーサは、別途開発を進めている50 W 級エンジン⁽⁴⁾に使用したものを流用している。ディスペーサの駆動には、周波数の設定が容易なパルスモータを使用している。パルスモータはマイクロコンピュータで制御され、0.5 Hz から 4.0 Hz までの周波数を 0.5 Hz 刻みに設定できるプログラムが書き込まれている。パワーピストンには 50 ml のガラス製注射器を流用している。

セミフリーピストン形エンジンのパワーピストンには、往復部質量に起因する慣性力、ばね定数に起因する復元力、水中で尾ひれを駆動することによる減衰力（尾部の駆動力）及び作動ガスの圧力変化による強制的な外力が作用する。セミフリーピストン形エンジンは共振周波数で運転することで適切な作動空間を構成するが、共振周波数は上記の力が複雑に関連するため、それを正確に推測し、設定するのは容易ではない。そのような観点から、本実験用エンジンでは復元力可変機構を取り付けた。図1に示した2本の機械ばね（ばね定数 $k \approx 360$ N/m）の位置を図中矢印の方向に

変化させることで、パワーピストンに作用する復元力を $1/3k$ から $3/3k$ の範囲で任意に設定できる。本機構は、サーボモータ等を用いることで、エンジン運転時に外部からの制御ができるように設計されているが、以下の実験では手動で変化させている。

パワーピストンと尾ひれとは図2に示すリンク機構で接続されている。リンク機構のアーム長さ r は 20, 25 及び 30 mm に設定でき、これによりパワーピストンのストローク S_i と尾ひれの振幅 A との比が変化し、減衰力を変化させることができる。なお、アーム長さ r を変化させること

Fig. 1. Schematic View of the Prototype Engine

Table 1. Specifications of the Engine

Displacer Piston	
Bore	36 mm
Stroke	10 mm
Power Piston	
Bore	27.5 mm
Stroke	~15 mm
Frequency	0~4 Hz
Mean Pressure	101.3 kPa

Fig. 2. Link Mechanism of the Tail Fin

により、往復部の等価質量が変化するため、慣性力も変化する事となる。

3. 魚ロボットの遊泳速度

本エンジンを魚ロボットに適用した場合の遊泳速度について検討するため、別途開発を進めている直流モータを使用した実験用魚ロボット（図 3）の測定データ⁽³⁾を解析した。図 4 は振幅 $A(\text{deg})$ を変化させた場合の周波数 $f(\text{Hz})$ と遊泳速度 $V(\text{m/s})$ の関係を示している。これより、魚ロボットの遊泳速度 V は尾ひれの周波数 f と振幅 A の影響を大きく受けていることがわかる。また、図中に実験結果を最小二乗法により処理した実験式(1)を図示している。若干の相違はあるものの、実験式は概ね実験結果を模擬していることがわかる。

$$V = 1.05 \times 10^{-3} \cdot \left(\frac{A}{2} \right)^{1.06} \cdot f^{1.54} \quad (1)$$

Fig. 3. Experimental Fish Robot with D/C Motor

Fig. 4. Swimming Speed of the Fish Robot

4. 実験方法並びに実験条件

図 5 に実験用エンジンの実験装置系統を示す。ディスプレイの上死点信号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、膨張空間及び圧縮空間のガス温度は K 熱電対により測定され、作動ガス圧力はひずみゲージ式圧力センサにより測定される。

実験は、室内水槽（1.5 m × 1.5 m）で行い、その中央付近に尾ひれを取り付けた実験用エンジンを固定した。したがって、尾ひれ周囲の水の流れは実際の遊泳時とは異なるため、測定するエンジン性能は実際の遊泳時と大幅に異なる可能性がある。なお、エンジンを台車に載せ、それに取り付けた糸の張力を測定することによって、推進力の測定

Fig. 5. Measuring System

Table 2. Experimental Condition

Heat Source	Electric Heater
Expansion Space Gas Temperature, T_E	400 deg C.
Cooling Method	Water Cooling
Mechanical Spring	
Spring Constant, k	360 N/m
Spring Force for Piston	1/3k, 2/3k, 3/3k
Tail Fin	Type A~D (Fig. 6)
Arm Length, r	20 mm, 25 mm, 30 mm

Fig. 6. Tail Fins for the Experiments

を試みたが、推進力が小さいため実測できなかった。

表 2 に実験条件を示す。エンジンの加熱源には電熱線を使用し、膨張空間ガス温度 T_E が 400°C になるように入熱量を調整した。冷却は水道水（流量 2 L/min ）による強制水冷とした。また、図 6 に示すような寸法が異なる 4 種類の尾ひれを用いて実験を行った。

5. 実験結果並びに考察

本エンジンの基本性能を調べるため、以上の様々なパラメータを変化させて実験を行った。

5.1 ピストン変位及び圧力 図 7 は、実験結果の一例として、Type C (60%) の尾ひれを用い、アーム長さ r を 20 mm 、ばね定数を $1/3k$ とした場合、周波数 $f=1\text{ Hz}$ 及び 4 Hz におけるピストン変位並びに圧力変化を示している。ここで、クランク角 $\theta=0^\circ$ はディスプレイサの上死点位置としている。また、 $f=1\text{ Hz}$ は同実験条件においてストロークの最大値が得られた共振周波数に近い周波数であり、 $f=4\text{ Hz}$ はそれよりもかなり高い周波数である（図 8 参照）。これより、パワーピストンは概ね正弦波に運動していることがわかる。また、ディスプレイサの上死点とパワーピストンの上死点（変位の最小値）とにピストン位相差 β が生じているものの、その値は $f=1\text{ Hz}$ において約 15° 、 $f=4\text{ Hz}$ において約 50° であり、理想的なスターリングエンジンの容積変化を与える $f=90^\circ$ よりもかなり小さい値である。

同様に、パワーピストンの容積変化と圧力変化とも位相差が生じていることが確認できるが、圧力変化の大きさや測定器の分解能に問題があり、本実験に使用した測定装置で正確な位相差を調べるには至らなかった。したがって、図示仕事や図示出力についての評価も今後の課題として考えている。

5.2 復元力の影響 機械ばねの固定位置を変化させ、パワーピストンに作用する復元力を変化させた。図 8 は Type C (60%) の尾ひれを用い、アーム長さ $r=20\text{ mm}$ とした場合、周波数 f に対するストローク S_t 及びピストン位

Fig. 7. Example of the Experimental Results

相差 β の実験結果を示す。これより、パワーピストンに作用する復元力を大きくすることで、共振周波数が高まり、ストロークが減少していることがわかる。この傾向は、一般的な振動系の特性と一致している。

5.3 減衰力の影響 図 2 に示したアーム長さ r を変化させて実験を行った。図 9 は Type B (80%) の尾ひれを用い、ばね定数を $1/3k$ とした場合、周波数 f に対するストローク S_t 及びピストン位相差 β の実験結果を示す。これより、アーム長さ r を長くするほど、比較的高い周波数域におけるストロークが増加していることがわかる。しかし、共振周波数付近 ($0.5\sim 1\text{ Hz}$) におけるストロークにはほとんど相違がないことがわかる。上述の通り、アーム長さ r を変えることは、パワーピストンに作用する減衰力と慣性力の両方を変化させることになるため、この現象を詳細に検討するためには、詳細な解析が必要である。

5.4 尾ひれ寸法の影響 図 7 に示した 4 種類の尾ひれを用いて実験を行った。図 10 は、アーム長さ r を 20 mm 、ばね定数を $1/3k$ とした場合、周波数 f に対するストローク S_t 及びピストン位相差 β の実験結果を示している。これより、Type A (100%) 及び Type B (80%) の尾ひれを用いた場合、本実験の範囲において共振周波数が現れていな

Fig. 8. Effect of Spring Constant

Fig. 9. Effects of Arm Length

Fig. 10. Effects of Tail Fin

いことがわかる。これは、減衰力が他のパラメータと比べて相対的に大きいためであると考えられる。また、Type D (40%) の尾ひれを用いた場合、周波数変化に対するストローク変化がかなり少ないことがわかる。これは減衰力が小さいため、本実験の範囲において適切な振動特性が得られなかったためであると考えられる。

5.5 遊泳速度についての検討 第3章で述べたように、魚ロボットの遊泳速度は周波数 f と振幅 A の影響を大きく受ける。そこで、ストローク S_t とアーム長さ r から振幅 A を導き、式(1)により遊泳速度を推定した。この際、尾ひれ寸法が遊泳速度に影響を及ぼすと考えられるため、実験に使用した尾ひれに対する図4に示した魚ロボットの尾ひれ

Fig. 11. Expected Swimming Speed

Fig. 12. Swimming Speed of the Model Boat

の横投影面積比で除して遊泳速度 V を算出している。図11は、4種類の尾ひれを用いた場合の周波数 f と遊泳速度の推定値 V との関係を示している。実験条件は図中に示したとおりである。また、図12は、本実験用エンジンを模型ボート⁽²⁾に搭載し、遊泳速度を測定した結果である。遊泳速度の実験は屋外水槽で実施しており、風等の影響を強く受けているため、ばらつきが大きい。また、遊泳速度の実験では、加熱源として小型ガスバーナを使用し、簡易的な空冷式クーラを使用している。さらに、重量と模型ボートの浮力の関係から測定装置を取り付けることができなかったため、運転条件が大きく異なる可能性があり、図11と図12とを比較することは難しい。しかし、両図において、遊泳速度 V は周波数 f の上昇に従って増加する傾向が見られており、エンジンの共振周波数よりかなり高い周波数で高い遊泳速度が得られていることがわかる。すなわち、魚を模擬した推進装置において、共振を利用したセミフリーピストン形エンジンの特徴が十分に活かされていないことを表している。

5. あとがき

以上、実験用セミフリーピストン形スターリングエンジンに各種測定装置を取り付け、主としてパワーピストンの振動特性を測定した。これらの結果は、エンジン的高出力化あるいはエンジン設計に利用するためのシミュレーションモデルの開発やエンジンの運動制御のために利用していきたいと考えている。また、ガス圧力の測定に問題があり、出力特性を評価するには至らなかったが、今後のエンジン開発に貢献できる結果が得られたものと考えている。

一方、直流モータを用いた実験用魚ロボットの測定データに基づき、本エンジンを利用した魚ロボットの遊泳速度を検討した結果、現状ではセミフリーピストン形エンジンの特徴が十分に活かされていないことが確認された。エンジン出力と負荷とのマッチングは今後の課題として残されている。

文 献

- (1) 平田ほか2名, 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(1999), p.78-79.
- (2) 平田ほか3名, セミフリーピストン形スターリングエンジンを用いた魚ロボットの開発, 日本機械学会第4回スターリングサイクルシンポジウム講演論文集(2000), p.93-94.
- (3) 平田宏一, 高速化を目指した実験用魚ロボットの開発, 日本設計工学会平成13年度春期研究発表講演会講演論文集(2001), p.69-72.
- (4) 平田宏一, 50 W 級小型スターリングエンジンの性能特性 (その3, ロンピック機構に関する考察と性能試験), 日本機械学会第5回スターリングサイクルシンポジウム講演論文集(2001)