# 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<sup>(1)</sup>。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<sup>(2)</sup>。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<sup>(3)</sup>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プレーサは,別途開発を進めている 50 W 級エンジン<sup>(4)</sup>に使用したものを流用している。ディス プレーサの駆動には,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<sup>\*</sup> 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 St 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

Tab	le 1.	Specif	fications	of t	the	Engine

	0		
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 することとなる。

## 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<sup>(3)</sup>を解析し た。図4は振幅 A(deg)を変化させた場合の周波数 f(Hz)と 遊泳速度 V(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。

$$V = 1.05 \times 10^{-3} \cdot \left(\frac{A}{2}\right)^{1.06} \cdot f^{1.54}$$
(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 レーサ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, <i>k</i>	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 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 1/3 k とした場合 ,周波数 f=1 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θ=0 deg はディスプレーサの上死点位置と している。また, f=1 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 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状に運動していること がわかる。また,ディスプレー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 Hz において約 15 deg , f=4 Hz において約 50 deg 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 deg 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 mm と した場合,周波数 f に対するストローク S<sub>t</sub>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 St 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(0.5~1 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20mm、 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 St 及びピストン位相差βの実験結果を示している。これよ リ、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<sub>t</sub>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



Fig. 11. Expected Swimming Speed



Fig. 12. Swimming Speed of the Model Boat

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 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<sup>(2)</sup>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もかなり高い周波数 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,エンジンの高出力 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ボジウム講演論文集(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)