

魚ロボット用スターリングエンジンに関する基礎研究

Fundamental Study on 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. In this paper, the performance of a simple experimental SFPSE - tail fin system was examined experimentally. Also possibilities of a SFPSE are discussed based on a simple simulation model.

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

1. まえがき

近年、海洋開発や海洋環境保全の観点から、海中ロボット開発が極めて重要な課題となっている。そのような背景に基づき、著者らは高い遊泳性能を有する海中作業ロボットの開発を目指して、魚の泳法を模擬したロボットの研究を進めている。本研究では、魚ロボットの推進・運動性能ばかりでなく、魚ロボットの自律制御や動力源についての研究も進めている⁽¹⁾⁻⁽³⁾。本報では、魚ロボット用動力源として検討している特殊なスターリングエンジンについて概説し、その基本特性を測定するために開発した実験用エンジンの性能特性について述べる。さらに、本エンジンのシミュレーション計算を行い、魚ロボットへの適用性について考察する。

2. 魚ロボットの概要

図1は、著者らが開発を進めている実験用魚ロボットである⁽⁴⁾。本魚ロボットは、直流モータを用いて2つの関節から構成された尾部を最高10 Hz程度の周波数で左右に往復運動させて推進する。一般の船舶において推進装置に用

いられているスクリーブプロペラが回転運動を利用しているのに対し、魚ロボットは往復運動を利用している点が大きく異なっている。

図2は、本魚ロボットにおいて、尾ひれの振幅を変化させた場合の周波数に対する遊泳速度の実験結果並びに尾ひれを駆動するために必要な出力の計算結果を示している。計算結果は、尾部を1枚の平板に置き換え、水の抗力を概算して求めた値である。これより、周波数の上昇に従って、魚ロボットの遊泳速度は緩やかに増加し、所要出力は急激に増加していることがわかる。

3. セミフリーピストン形スターリングエンジン

本魚ロボットをはじめ、従来から開発されている海中ロボットのほとんどは、蓄電池を用いた電気モータを動力源としている。蓄電池は取り扱いが容易であるが、エネルギー密度が低く長時間の航行が困難であるという問題がある。一方、高効率で高エネルギー密度な熱源を用いるスターリングエンジンは長時間航行を可能にすると考えられる。

図3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構造を示している。本エンジンは、

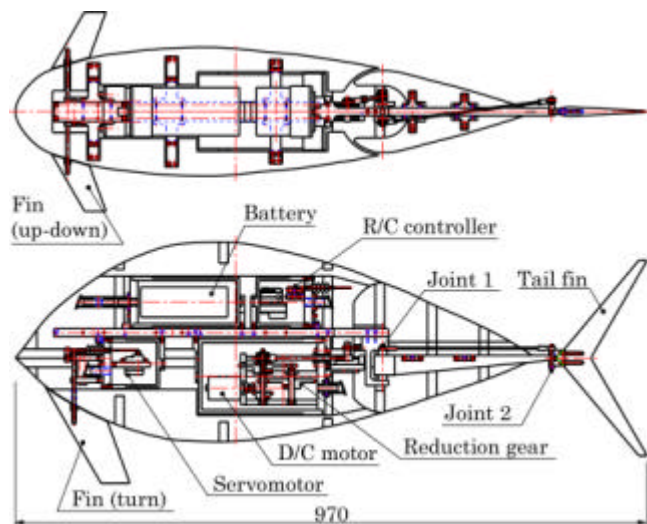


Fig. 1, Experimental Fish Robot Powered by D/C Motor

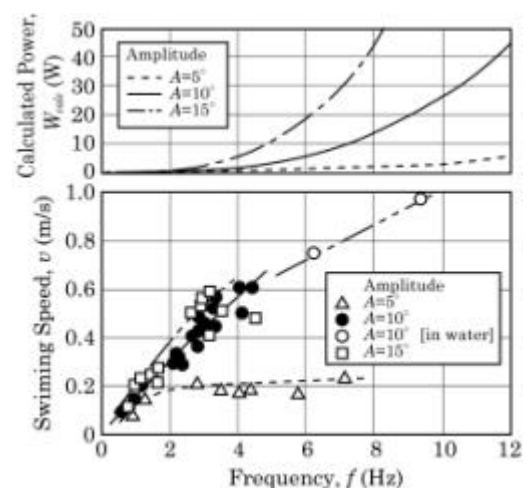


Fig. 2, Performance of the Experimental Fish Robot

一般の回転式スターリングエンジンと同様，ディスプレイサとパワーピストンの2つのピストン並びに熱交換器から構成されている。しかし，セミフリーピストン形エンジンは，ディスプレイサを小型の電気モータで往復運動させ，ディスプレイサとパワーピストンとに機械的な連結がされていないという特徴がある。

作動空間に適切な温度差を設けた状態でディスプレイサを往復運動させると，作動空間に圧力変化が生じ，パワーピストンは往復運動を開始する。パワーピストンは，往復部質量による慣性力，機械ばねによる復元力，水の抗力に起因する負荷（減衰力）及びディスプレイサの運動による圧力変化（外力）を考慮した一自由度強制振動系を構成するものと見なされる。振動系の共振周波数でディスプレイサを運動させると，パワーピストンの変位は増大し，一般のスターリングエンジンと同様の作動空間の構成となる。

本エンジンは，パワーピストンの往復運動から直接動力を取り出すことができ，一般のエンジンに用いられているクランク機構での機械損失がない。そのため，往復運動を利用する魚口ボットの動力源に適していると考えられる。なお，ディスプレイサ両端の圧力差は極めて小さく，またディスプレイサ・ロッドの断面積はシリンダ径に比べて非常に小さいため，ディスプレイサを駆動させる電気モータのエネルギーは小さくてすむ。

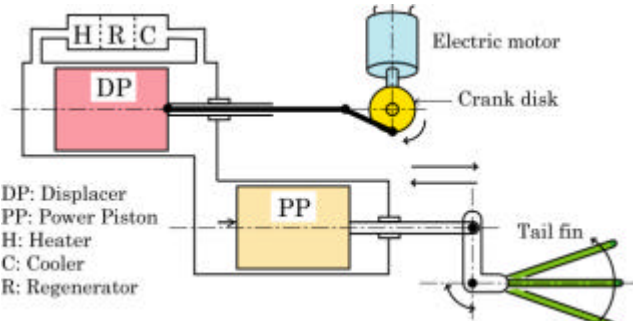


Fig. 3, Structure of a Semi Free Piston Stirling Engine

4.実験用スターリングエンジンの性能特性

セミフリーピストン形エンジンの基本特性を調べるため，大気圧空気で作動する実験用エンジンを試作した。以下，試作したエンジンの構造と基本的な特性について述べる。

4・1 模型エンジンの構造 図 4 に模型エンジンの構造，表 1 に主な仕様を示す。ディスプレイサの駆動には，周波数の設定が容易なパルスモータを使用した。また，本エンジンには簡易的な復元力可変機構が取り付けられており，図 4 に示した機械ばね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任意に設定できる。パワーピストンと尾ひれとは図 5 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 を調整することにより，パワーピストンのストロークと尾ひれの振幅との比が変化し，減衰力を変化させることができる。

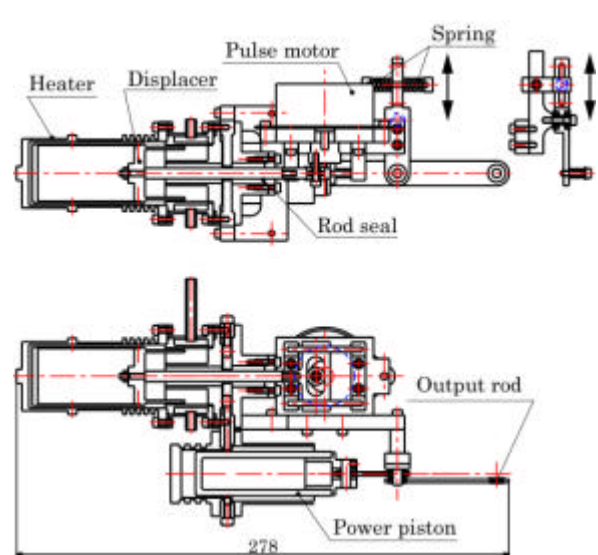


Fig. 4, Structure of Experimental Engine

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

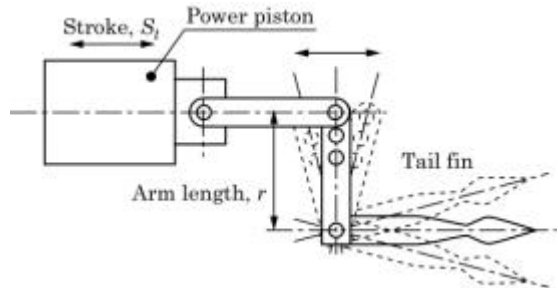


Fig. 5, Link Mechanism of the Tail Fin

4・2 模型エンジンの基本性能 本エンジンに図 6 の尾ひれを取り付け，室内水槽（1.5 m × 1.5 m）で振動特性を測定した。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。冷却は水道水による強制水冷とした。

図 7 は，機械ばねの固定位置を変化させた場合，周波数

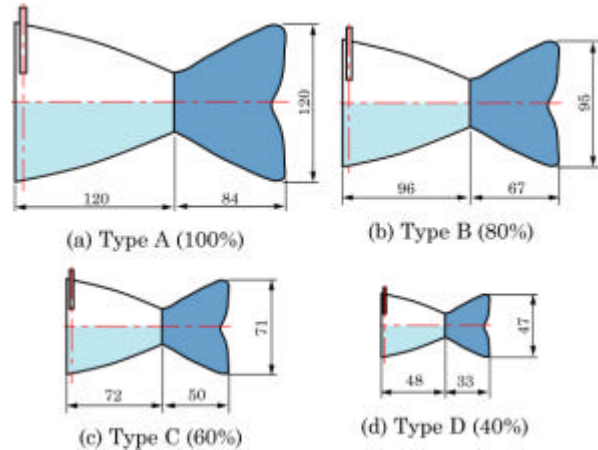


Fig. 6, Tail Fins for Experiments

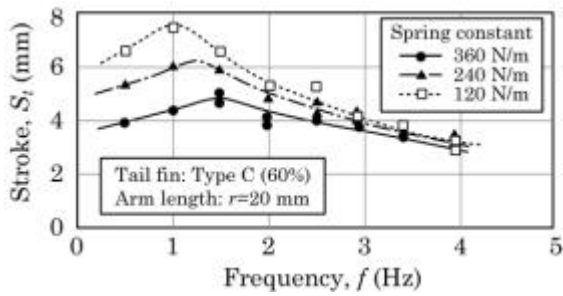


Fig. 7, Effects of Spring Constant

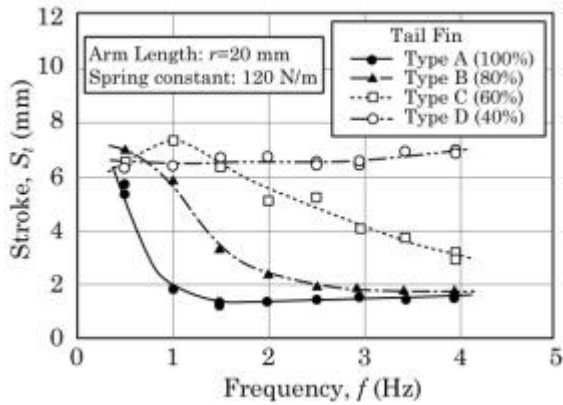


Fig. 8, Effects of Tail Fin Size

f に対するストローク S_t の実験結果を示している。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。

図 8 は、4 種類の尾ひれを用いた場合、周波数 f に対するストローク S_t 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%) 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表れなかったためであると考えられる。

4.3 模型ボートによる動作確認 本実験用エンジンが魚を模擬した推進装置に適用できることを確認するため、図 9 に示す模型ボートに搭載した。図 10 は、模型ボートの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た。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、上述の実験とは運転条件が大きく異なる可能性があり、エンジン単体の実験結果と比較することは難しい。しかし、図 10 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。これは、図

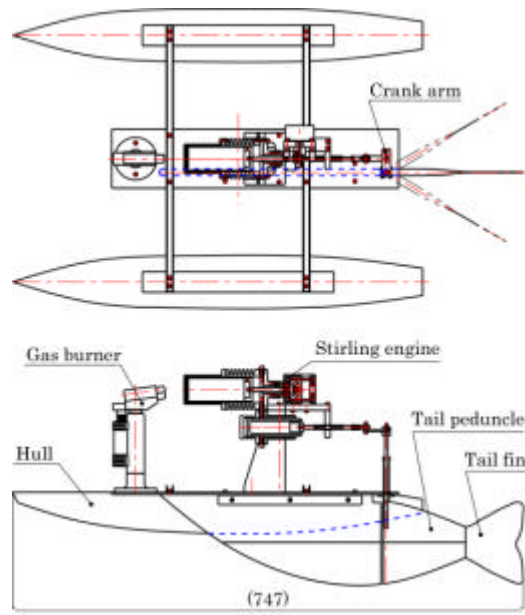


Fig. 9, A Model Boat with the Engine

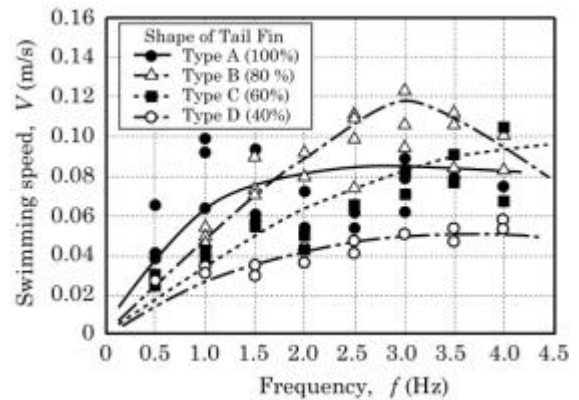


Fig. 10, Swimming Speed of the Model Boat

9 の模型ボートにおいて、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. 魚ロボット用エンジンの高出力化

以上に述べた実験用エンジンは出力が小さく、実用的な魚ロボットに適用することはできない。以下、簡易的なシミュレーション計算に基づき、エンジンの高出力化について検討する。

5.1 シミュレーションモデル 図 11 にシミュレーションモデルを示す。本シミュレーションにおいて、エンジン内の作動ガス圧力は、一般のスターリングエンジンの解析に用いられる等温モデル⁽⁹⁾を用いた。パワーピストンのストローク x は、式(1)の運動方程式から求められる。

$$m \frac{d^2 x}{dt^2} = F_p - F_{fin} - k(x - x_s) \quad (1)$$

$$F_p = A_p (P - P_B) \quad (2)$$

ここで、 m は往復部質量であり、式(1)の左辺はパワーピス

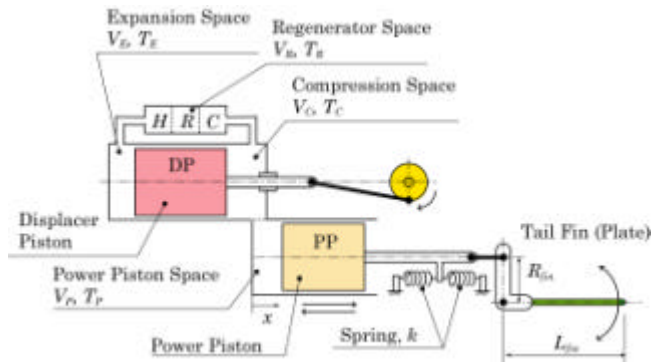


Fig. 11, Simulation Model

トンの慣性力を示している。 F_P はガス圧力による力であり、エンジン内圧力 P 、ピストン背面の圧力（バッファ圧力） P_B 及びピストン断面積 A_P より求められる。 F_{fin} は水の抗力であり、本シミュレーションにおいては平板の抗力（抗力係数 $C_D=1.2$ ）として概算した。 k はばね定数、 x_s はばねの中立位置であり、 $k(x - x_s)$ はばねの復元力を表している。

5.2 計算結果及び考察 セミフリーピストン形エンジンは、振動特性に影響を及ぼす多くのパラメータを持ち、そ

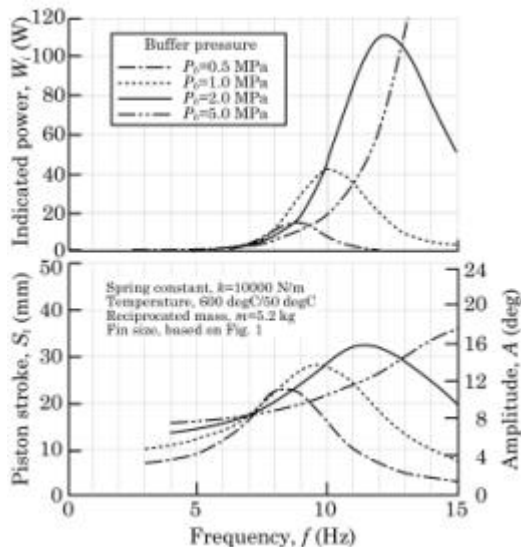


Fig. 12, Effects of Buffer Pressure

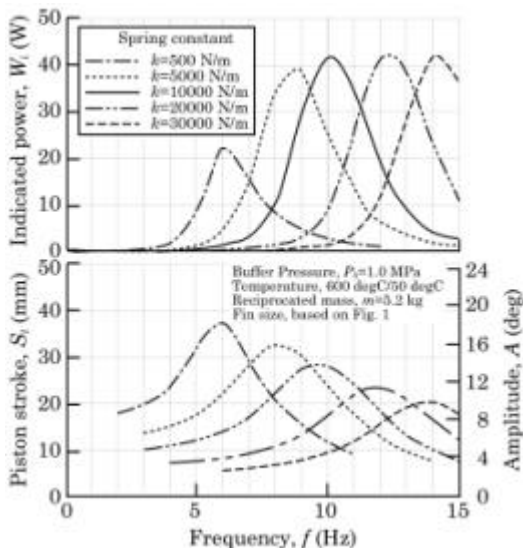


Fig. 13, Effects of Spring Constant

の設定は様々である。以下の計算では、図 1 に示した魚口ボットの尾部寸法並びに図 4 に示した実験用エンジンの寸法を基にして設定した。

スターリングエンジンの出力を向上させる方法として、作動圧力を高めることがあげられる。図 12 は、ばね定数を $k=10000$ N/m とし、バッファ圧力 P_B を変化させた場合の周波数 f に対するパワーピストンのストローク S_i 及び図示出力 W_i の計算結果を示している。図 2 の所要出力の計算結果から推測して、本魚口ボットを振幅 10 deg 程度で運動させるためには、バッファ圧力を 1 MPa 程度に高める必要があることがわかる。

図 13 は、バッファ圧力を $P_B=1.0$ MPa とし、ばね定数 k を変化させた場合の周波数 f に対するストローク S_i 及び図示出力 W_i の計算結果を示している。ストローク S_i の計算結果は図 7 の実験結果と同様の傾向を示している。一方、図示出力 W_i の最大値は、周波数の上昇に従って増加するものの、ばね定数 k が 5000 N/m を越えるとその増加量は小さいことがわかる。このような振動特性は、ばね定数やバッファ圧力の他、尾ひれの寸法等の影響を強く受け、それぞれの運転条件における最適値が存在すると考えられる。実際に本エンジンを魚口ボットに適用する場合には、適切な制御機構が必要不可欠である。

なお、本シミュレーションを上述の実験用エンジンの実験結果に適用した場合、シミュレーションの計算精度はかなり低いことが確認されている。エンジンの高出力化を詳細に検討するためには、尾ひれの負荷特性を模擬できる高精度なシミュレーションモデルの開発が必要である。

6. あとがき

以上、魚口ボット用動力源として、セミフリーピストン形スターリングエンジンに着目し、その基本特性について検討した。実験用エンジンの性能特性やシミュレーションの計算精度は必ずしも十分ではないが、それらの検討結果は今後のエンジン開発に貢献するものと考えている。

一方、エンジンの出力制御や高圧条件下で運転することによる諸問題、使用する熱源については未だ研究に着手していない状況であり、今後の課題として残されている。

文 献

- (1) 平田ほか 2 名, 魚口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口ボットの開発, 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, 魚口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, 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), p.23-26.
- (4) 平田ほか 1 名, ユニット式魚口ボットの設計・試作, 日本設計工学会平成 14 年度春期研究発表講演会講演論文集(2002), 発表予定.
- (5) 山下ほか 4 名, スターリングエンジンの理論と設計, p.37-44, 山海堂(1999)