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 Semi-Free Piston Type Stirling Engine for a Fish Robot

正 平田 宏一(船舶技研) 植木原 明(東京電機大) 正 山下 巖(東京電機大)

Koichi HIRATA, Ship Research Institute, Shinkawa 6-38-1, Mitaka, Tokyo Akira UEKIHARA and Iwao YAMASHITA, Tokyo Denki University, Tokyo

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

1.まえがき

昨今,魚の泳法を模擬した水中推進装置の研究開発が活 発に行われている⁽¹⁾。著者らも高効率な推進装置の開発を 目指して,1999 年度より魚の泳法を模擬した無策無人海中 ロボット(魚ロボット)に関する研究を開始した⁽²⁾。本研 究は,推進特性,旋回特性及び運動制御といった魚ロボッ トの基本特性を評価し,さらに魚ロボットに用いる最適な 動力源を検討することを目的としている。

本報では,魚ロボット並びにセミフリーピストン形スタ ーリングエンジンの構造及び特徴について概説し,本エン ジンの魚ロボットへの適用性について検討する。

2.魚ロボット及びセミフリーピストン形エンジン

2・1 魚ロボットの構造 図1は開発を進めている全長 600 mmの実験用魚ロボットを示している。この魚ロボッ トは,3つの関節から構成された尾部を2つのサーボモー タを用いて最高3~5 Hz程度の周波数で左右に往復運動さ せて推進する。現在,船舶の推進装置に用いられているス クリューは回転運動を利用しているが,魚ロボットの推進 には往復運動を利用している点が大きく異なる。

2・2 エンジンの構造及び特徴 図 2 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。ディスプレーサを小型の電気モータで往 復運動させる。ディスプレーサ両端の圧力差は極めて小さ く,またディスプレーサ・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,ディスプレーサを駆動する電気 モータの消費電力は小さくてすむ。

パワーピストンは,往復部質量 m,機械ばね(ばね定数 k),負荷(粘性係数 c),作動ガス圧力変化の影響(外力 F(x,t))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。したがって,パワーピストンの運動方程式は



Fig. 1 Structure of the experimental fish robot



Fig. 2 Outline of the semi-free piston type Stirling engine

次式で表される。

$$m x = -kx - cx + F(x,t)$$
(1)

ディスプレーサを往復運動させると,作動空間に圧力変 化が生じ,パワーピストンは微小な往復運動を開始する。 そして,ディスプレーサの運動を式(1)から決まる共振周波 数に同調させれば,パワーピストンの変位は増大し,一般 の 形エンジンと同様に動作する。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, しかもフライホイールを省略できるため,小型かつ軽量化 が可能である。しかし,ディスプレーサとパワーピストン がクランク機構で連結されていないため,ピストンの位置 や位相差の制御が難しくなるという問題が考えられる。

2・3 魚ロボットへの応用 従来から開発されている海 中ロボットは,一般に蓄電池を用いた電気モータを動力源 としているが,蓄電池はエネルギ密度が低く長時間の航行 は困難である。これに対して,エネルギ密度の高い燃料な どを用いる高効率のスターリングエンジンを適用すれば, 長時間の航行が可能になると考えられる。

ー般のエンジンで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。フライホイールにより平 滑化された回転運動は,船舶のスクリューの駆動には適し ている。しかし,魚ロボットの場合,ピストンの往復運動 を直接尾部の往復運動に利用すれば,クランク機構やプロ ペラ軸での機械損失を大幅に低減できる可能性がある。

また,魚ロボットに用いるセミフリーピストン形スター リングエンジンは,従来から開発されているスターリング エンジンに比べて,かなり低い周波数(最高3~5 Hz)で 運転されるため,熱交換器での圧力損失及びディスプレー サに作用する慣性力がかなり小さくなり,ディスプレーサ の駆動エネルギを大幅に低減できると予想される。

さらに、セミフリーピストン形スターリングエンジンは、 回転運動をする他のエンジンと比べて,往復運動の周波数 制御が容易である。これらの理由から, セミフリーピスト ン形スターリングエンジンは魚ロボットに適した動力源で あると考えられる。

一方,低い周波数で運転されるため,パワーピストンか らのガス漏れによる性能低下が生じること,機構部での静 摩擦の影響が大きくなり,パワーピストンの運動を期待通 りに維持するのが難しくなること,所要の出力を得ようと するとエンジンが大型化すること等の問題が生じる恐れも 高い。

3. 出力レベルの検討

エンジンの出力は容積や圧力等によって影響を受ける。 また,魚ロボットを駆動するために必要なエネルギは魚口 ボットの形状や運動パターンによって大きく影響を受ける。 そのため,エンジン出力の設定についてはそれぞれの解析 や設計と併行して詳細に検討しておく必要がある。以下で は,著者らが開発を進めている50 W級スターリングエン ジン⁽³⁾の諸寸法に基づき,簡易的な検討を試みる。

図3はシュミット理論(4)で得られるエンジンの平均圧力 P...に対する出力 Wの計算結果を示している。計算条件は, ディスプレーサ,パワーピストンともにシリンダ径36mm, ストローク 10 mm, ピストン位相差は 90 deg, 周波数は 5 Hz,高温空間及び低温空間のガス温度はそれぞれ 600 である。これより、P_m=1 MPa で 10 W、P_m=10 MPa 40 で100W程度の出力が得られることがわかる。

図4は魚ロボットの全長Lに対する尾部を駆動するため に必要なエネルギ W₍(負荷)の計算結果を示している。負 荷は,尾部を平板と見なし,それを5 Hzの周波数で左右 に 30 deg ずつ往復運動をさせ, 平板に垂直に作用する水 の抗力として算出した⁽²⁾。これより,魚ロボットの全長 L の増加に伴い,負荷が急激に増大し,L=0.3mのとき10W 程度, L=0.5 m のとき 100 W 程度になることがわかる。魚 ロボットが推進している場合,水の抗力は進行方向に垂直 な方向には作用しないため,負荷は図4による予測よりも 低下すると考えられるが,図3に示したエンジン出力が十 分であるとは言い難い。



Fig. 4 Load due to tail fin

4.実験用セミフリーピストン形エンジン

本研究の第一段階として,簡単な実験用エンジンを設 計・試作した。図5に試作エンジンの構造,図6に外観を 示す。ディスプレーサ (ピストン径 18 mm, ストローク 16 mm) 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なっている。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(シリンダ径20mm)を流用している。パワー ピストンの一端には機械ばねが取り付けられており,ばね 定数及び負荷の大きさを変化させることによって式(1)に 示す振動系の特性を調整できる。今後,この試作エンジン を用いて,基本的な動作を確認し,魚ロボットへの適用性 について詳細な考察を行う予定である。



Fig. 5 Schematic view of the prototype engine



Fig. 6 The prototype engine for demonstration

5. あとがき

セミフリーピストン形スターリングエンジンは, ロボッ ト開発の観点からすると熱エネルギ利用のアクチュエータ と位置づけられ,魚ロボットにおけるような周期的な往復 運動の駆動源として適していると考えられる。本報で述べ たように,低い周波数で運転することにより生じる問題, さらに運動制御手法や熱源の検討等,多くの課題を抱えて いるが,魚ロボットへの応用はスターリングエンジンの用 途の一つとして有望であると考えている。

文 献

- 加藤直三,アクアバイオメカニズムに関する研究動向, (1) 日本造船学会誌, 830(1998), p.34-41.
- 平田ほか, 魚ロボットに関する研究, 平成11年度(第73 (2)回)船舶技術研究所研究発表会講演集(1999), p.190-193
- 平田宏一, 50W 級小型スターリングエンジンの設計・試 (3)作. 日本舶用機関学会第62回学術講演会(1999), p.53-56.
- 岩本ほか、模型スターリングエンジン、(1997)、p.32-38、 (4)山海堂.