

20,000 kW 級船舶用スターリングエンジンの検討

Technical Approach for a 20,000 kW Class Marine Stirling Engine

○ 正 平田 宏一 (海技研) 正 井 亀 優 (海技研)

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

Key words: Stirling Engine, External Combustion Engine and Marine Engine

1. まえがき

従来から開発されてきた実用スターリングエンジンは、数 kW ~ 数十 kW 程度の出力レベルであり、大型船用ディーゼルエンジンに匹敵するような、大出力のスターリングエンジンが実際に開発されたことはない。本報では、スターリングエンジンの大出力化に着目し、相似則や簡易的な伝熱計算の結果に基づき、出力 20,000 kW の船舶用スターリングエンジンの概念設計を試みる。

2. 船用エンジンの概要とスターリングエンジンの形式

2.1 船用ディーゼルエンジン 現在、ほとんどの大型船舶にはディーゼルエンジンが使われており、その形式や出力レベルは様々である。全長 200 ~ 300 m の貨物船では、出力 15,000 ~ 25,000 kW 程度のエンジンが使われている。一例として、三菱重工社の UEC68LSE⁽¹⁾ (行程容積 0.98 m³, ボア径 680 mm × ストローク 2690 mm) は、8 シリンダで出力 20,040 kW / 81 rpm, エンジンの全高さは 13.9 m, クランク軸長手方向の長さは 11.6 m である。

2.2 スターリングエンジンの形式 大型スターリングエンジンの形式を考えた場合、 α 形及び γ 形はエンジン寸法の点で不利であり、 β 形はクランク機構が複雑になるため大型エンジンには適していないと考えられる。したがって、エンジン寸法やクランク機構の構成を考えた場合、ダブルアクティング形エンジンが適当であると考えられる。上述のディーゼルエンジンと同様、8 シリンダで 20,000 kW を得ることとし、1 ユニット (α 形エンジン 1 基に相当) 当たり 2,500 kW の出力を得るエンジンを想定する。

3. 簡易性能予測法による検討

エンジンの主要寸法や仕様を求めるに当たって、多種エンジンの実測データに基づく簡易性能予測法⁽²⁾を用いた。本手法は、圧力、温度、行程容積、エンジン回転数及び軸出力等を次元解析法によって整理したものであり、作動ガスの種類が軸出力に及ぼす影響や最高軸出力が得られるエンジン回転

数を予測できるという特徴がある。なお、本性能予測で使用した実験式は、既存のスターリングエンジン (最高 127 kW) のデータに基づき作成されており、本報で述べるような大出力エンジンへの適用性は明らかでない。

図 1 は、作動ガスを空気とし、平均ガス圧力 P_m を 5, 10 及び 15 MPa とした場合、パワーピストンの行程容積 V_{SE} に対する軸出力 L_S 及びエンジン回転数 N の計算結果を示している。これより、 $P_m=10$ MPa とした場合、約 1.2 m³ の行程容積で 2,500 kW の軸出力が得られることがわかる。また、そのときのエンジン回転数は約 73 rpm であり、上述のディーゼルエンジンと大きな相違はない。

なお、作動ガスをヘリウムとして計算すると、約 0.4 m³ の行程容積において 2,500 kW / 240 rpm の軸出力が得られると推算され、エンジンの大幅な小型化が可能であることがわかった。しかし、大型・大出力エンジンにヘリウムを高圧で封入することは困難であると考えたため、以下では作動ガスを空気として概念設計を進めた。

4. 船用スターリングエンジンの概念設計

4.1 主要寸法の決定 以上の性能予測法の計算結果に基づき、エンジンの主要寸法を検討した。ディーゼルエンジンでは適切な燃焼状態を保つためにストロークを長くしている。一方、スターリングエンジンの場合、熱交換器の配置を考えるとシリンダ径を大きくすることが望ましい。しかし、シリンダ径が大きくなると、シリンダを直列配置した場合のクランク軸長手方向の寸法が増大すること、耐圧強度を維持するためのシリンダの肉厚が厚くなること等の問題が生じる。これらを検討した結果、シリンダ径 1,200 mm, ストローク 1,060 mm (行程容積 1.2 m³) とした。

4.2 熱交換器 多管式ヒータを検討するに当たって、シュミット理論によりエンジン内最高圧力を概算し、ヒータ材質を SUS316HTP (700 において許容応力 $\sigma_a=29.4$ N/mm²) とし、ヒータ管の肉厚を求めた。さらに、シリンダヘッドに配置可能な本数を推算し、簡易的な伝熱計算⁽³⁾を行い、ヒータ管長さとガス温度、ヒータ管温度の関係を求めた。実際のエンジン設計においては、ヒータ管の加工方法等について検討する必要があるが、以下では、これらの結果から、内径 20 mm, 外径 30 mm, 長さ 3,000 mm, 本数 1,200 本のヒータ管を用いることとした。なお、再生器については、後述するシミュレーション計算を行い、高い図示熱効率が得られるように寸法を決めた。クーラについては、温度上昇による強度不足の問題が少ないため、簡易的な伝熱計算のみ行った。

4.3 クランク機構及びシール機構 クランク機構については、ディーゼルエンジンのクロスヘッド機構をベースとして寸法・形状を考えた。また、スターリングエンジン特有の要素として、高圧な作動ガスを密封するための厳重なロッドシール並びにシール性が高く、しかも無潤滑で作動するピストンリング等がある。

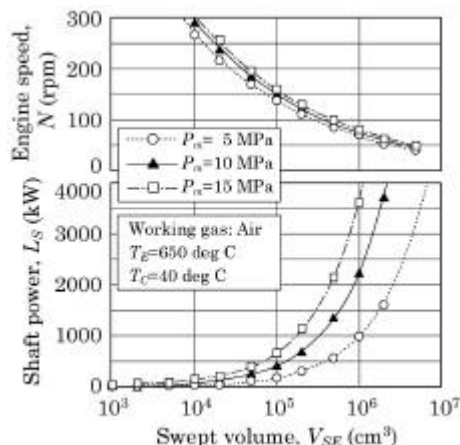


Fig. 1, Calculated results by simple prediction method

4・4 基本構造及び性能試算 図2は、以上の検討より主要寸法を求めた、船用スターリングエンジンの基本構造を示している。表1に本エンジンの主な仕様を示す。エンジンの全高さは12.7 m、クランク軸長手方向の長さは22.4 mであり、上述のディーゼルエンジンと比較すると、高さはほとんど変わらないが、長さが2倍程度となった。なお、燃焼器についての詳細な検討はなされていないが、大まかな寸法は市販の重油焚きボイラを参考にしている。

図3は、山下が開発した熱力学的設計プログラム"SCM20"⁽⁴⁾を用いて、本エンジンの性能を試算した結果である。定格回転数73 rpmのとき、図示出力は33,776 kW、有効熱入力 Q_{in} は75,408 kW、冷却熱量は41,632 kWである。再熱損失や熱伝導損失等の熱損失が相対的に小さいため、有効熱入力と膨張空間図示出力の差はかなり小さく、内部変換効率と図示熱効率はともに45%程度である。機械損失については不明な点が多いが、設定出力の20,000 kWが得られるとすると、全熱効率(=軸出力/有効熱入力)は27%程度である。これは、現在の船用ディーゼルエンジンの熱効率と比べてかなり低い値である。なお、図中の軸出力は、定格回転数で設定出力が得られるようにメカニズム効率を設定して求めている。

Table 1, Specifications of the marine Stirling engine

Type		Double acting type
Working gas		Air
Mean engine pressure		10 MPa
Shaft power		20,000 kW (2,500 kW x 8 cylinders.)
Bore x Stroke (Swept volume)		1200 x 1060 mm (1.20 m ³)
Rated engine speed		73 rpm
Fuel		Heavy oil
Heater wall temperature		700 deg C
Gas temperature, Hot / Cold		650 deg C / 40 deg C
Heater	Type	Multi-tube type
	Diameter	20 mm (ID), 30 mm (OD)
	Length No. of tubes	3000 mm 1200
Regenerator	Type	Annular tube
	Diameter	1420 mm (ID), 1960 mm (OD)
	Length Mesh	300 mm #100 x 1500 seats
Cooler	Type	Multi-tube type
	Diameter	10 mm (ID), 15 mm (OD)
	Length No. of tubes	500 mm 5000

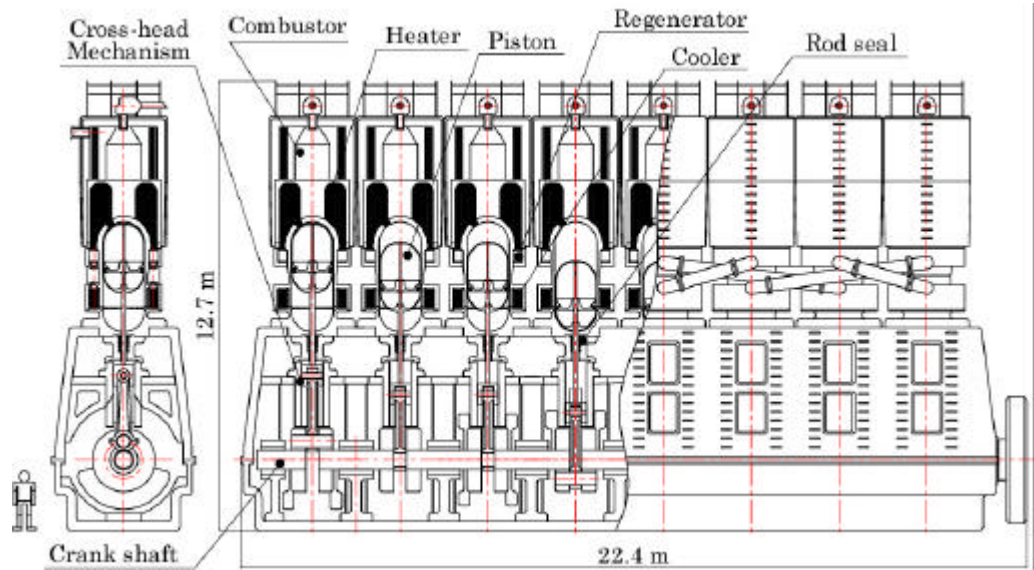


Fig. 2, Conceptual drawing of the 20,000 kW class marine Stirling engine

5. あとがき

本報では、簡易的な性能予測や伝熱計算を行い、大型船用スターリングエンジンの概念設計を行った。その結果、スターリングエンジンの大型化についての様々な知見が得られたものの、現状のディーゼルエンジンを上回る性能は確認できなかった。また、本報で述べたスターリングエンジンは、最適設計がなされた構造・寸法ではなく、計算の妥当性についても明らかではない。船用スターリングエンジンの適用性を考察するためには、より詳細な解析が必要である。

文 献

- (1) 三菱重工神戸造船所ホームページ, <http://www.mhi.co.jp/kobe/>
- (2) 岩本, 平田, 戸田, スターリングエンジンの性能特性(特に実測値の整理法と性能予測法について), 機論 65-635B, (1999), 2547-2554.
- (3) 山下ほか, スターリングエンジンの理論と設計, 山海堂(1999), p.337.
- (4) 文献(3)のp.263-286.

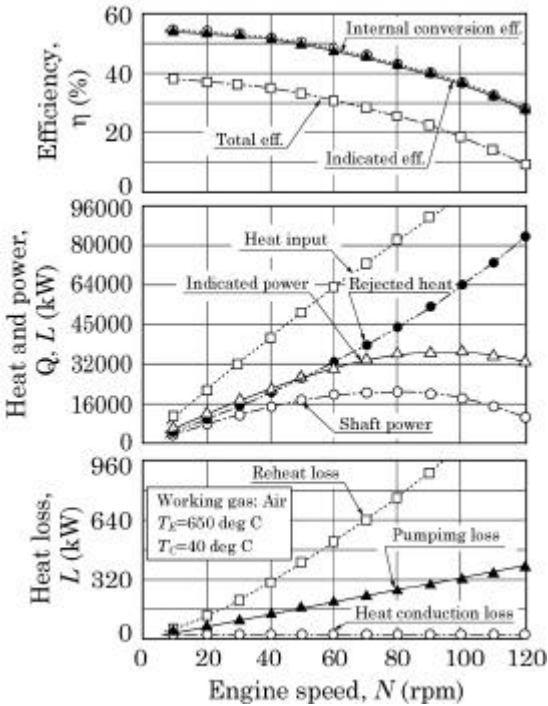


Fig. 3, Calculated results of engine performance by SCM20 (Adiabatic model, AD)