

スターリング機関の機関性能の簡易予測法 (第2報)

— 断熱膨張温度を考慮した場合 —

A Simple Method of Predicting the Stirling Engine Performance (2nd Report :)
— Consideration of the Adiabatic Expansion Temperature —

吉 識 晴 夫*・高 間 信 行*・上 村 光 宏*
Haruo YOSHIKI, Nobuyuki TAKAMA and Mitsuhiro UEMURA

1. ま え が き

前報¹⁾で加熱器および冷却器の容積が機関性能に及ぼす影響を明かにした。しかし、実際の機関では膨張室内の温度 T_1 は加熱器内温度 $T_2 (=T_H)$ より低くなり、 T_1 がサイクル中常に T_H に等しく保たれると仮定することは余り適当ではない。

本報告では、膨張室内の温度低下を考慮した簡易計算法について述べる。

2. 計 算 モ デ ル

前報と同じ単動2ピストン型のスターリング機関で考え、記号や添字なども全く同様に用いる。また、機関性能の計算に際しての仮定も(6)を除き前報と同じである。すなわち、

(1) 熱交換器での圧力損失は無視して、機関内では圧力一様とする。

(2) 圧縮過程、膨張過程は等温変化とする。

(3) 膨張室容積、圧縮室容積は正弦状に変動する。

(4) 作動流体は完全ガスの状態式に従い、機関外部への漏れは無い。

(5) 完全な再生熱交換を行う。

(6) 加熱器内流体温度 T_2 は高温側の温度 T_H に、冷却器内流体温度 T_4 と圧縮室内流体温度 T_5 は低温側の温度 T_C に保たれる。一方、膨張室内流体温度 T_1 は T_2 と T_4 から機関圧縮比 ε に相当する断熱膨張をしたときの温度 $T_2 \varepsilon^{1-k}$ との平均温度に保たれる。

(7) 再生器内流体温度 T_3 は T_H と T_C との平均温度に保たれる。

3. 計 算 法

以上の仮定により、膨張室の瞬時容積 V_1 は膨張室行程容積 V_E 、頂隙空間 V_{1D} および位相角 θ を用いて、

$$V_1 = \frac{1}{2} V_E (1 - \cos \theta) + V_{1D} \quad (1)$$

と表され、同様に圧縮室の瞬時容積 V_5 は圧縮室行程容積 V_C 、頂隙空間 V_{5D} および位相差 $\Delta\theta$ を用いて、

$$V_5 = \frac{1}{2} V_C \{1 - \cos(\theta - \Delta\theta)\} + V_{5D} \quad (2)$$

と書ける。加熱器容積を V_2 、再生器容積を V_3 、冷却器容積を V_4 とすると、機関内作動流体の全質量 M は機関内圧力の瞬時値 p 、ガス定数 R を用いて、

$$M = \sum_{i=1}^5 \frac{pV_i}{RT_i} \quad (3)$$

と書ける。ここに、仮定(6)、(7)により、

$$\left. \begin{aligned} T_1 &= T_2 (1 + \varepsilon^{1-k})/2 \\ T_2 &= T_H \\ T_3 &= (T_H + T_C)/2 \\ T_4 &= T_5 = T_C \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

であり、 ε は機関の圧縮比、 k は作動流体の比熱比である。ここで、

$$\left. \begin{aligned} \text{温度比} \quad \tau &= T_C/T_H, \quad \tau_1 = T_1/T_H \\ \text{行程容積比} \quad \kappa &= V_C/V_E \\ \text{死容積比} \quad X_1 &= V_{1D}/V_E, \quad X_2 = V_2/V_E, \\ &X_3 = V_3/V_E, \quad X_4 = V_4/V_E, \\ &X_5 = V_{5D}/V_E \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

を導入し、式(1)、(2)を用いて式(3)より圧力 p を求めると、

$$p = MRT_H / \{A' - D' \cos(\theta - \phi)\} \quad (6)$$

となる。ここに、

$$\left. \begin{aligned} A' &= \frac{V_E}{2\tau} \left\{ \frac{\tau}{\tau_1} (1 + 2X_1) + 2\tau X_2 + \frac{4\tau}{1+\tau} X_3 \right. \\ &\quad \left. + 2X_4 + 2X_5 + \kappa \right\} = \frac{V_E}{2\tau} A \\ B' &= \frac{V_E}{2\tau} \left\{ \frac{\tau}{\tau_1} + \kappa \cos \Delta\theta \right\} = \frac{V_E}{2\tau} B \end{aligned} \right\}$$

* 東京大学生産技術研究所 第2部

$$\left. \begin{aligned} C' &= \frac{V_E}{2\tau} \left\{ \kappa \sin \Delta\theta \right\} = \frac{V_E}{2\tau} C \\ D' &= \sqrt{(B')^2 + (C')^2} = \frac{V_E}{2\tau} D \\ \phi &= \tan^{-1}(C'/B') \end{aligned} \right\} (7)$$

である。

この圧力を用いてピストンが1サイクル当たりにする仕事を前報と同様に求めると次式となる。

$$\left. \begin{aligned} L_E^* &= \frac{L_E}{MRT_H} = \frac{2\pi\tau}{D} \left(\frac{A}{\sqrt{A^2 - D^2}} - 1 \right) \\ &\quad \times \sin \phi \\ L_C^* &= \frac{L_C}{MRT_H} = \frac{2\pi\tau\kappa}{D} \left(\frac{A}{\sqrt{A^2 - D^2}} - 1 \right) \\ &\quad \times \sin(\phi - \Delta\theta) \\ L_i^* &= \frac{L_i}{MRT_H} = L_E^* + L_C^* \\ L_i^{**} &= \frac{L_i}{p_{\max} V_T} = \frac{A-D}{2\tau(1+\kappa)} L_i^* \end{aligned} \right\} (8)$$

ここに、

$$\left. \begin{aligned} p_{\max} &= MRT_H / (A' - D') \\ V_T &= V_E + V_C = V_E (1 + \kappa) \end{aligned} \right\} (9)$$

である。

また、図示熱効率 η_i は、

$$\eta_i = L_i / L_E = L_i^* / L_E^* = 1 - \tau / \tau_1 \quad (10)$$

より求まる。

4. 計算結果と考察

機関の1サイクル当たりの図示仕事を式(8)より求める。式(7)で $\tau_1 = 1.0$ とした前報の結果と比較しながら、各パラメータの影響について述べる。各場合とも、特にことわらない限り $X_1 = X_5 = 0$ である。

4.1 ピストン位相差の影響

膨張ピストンと圧縮ピストンの位相差 $\Delta\theta$ が図示仕事に及ぼす影響を図1に示す。ここには、行程容積比 $\kappa = 1.0$ 、死容積比 $X_2 = 0.3$ 、 $X_3 = 0.5$ 、 $X_4 = 0.3$ の場合の結果を、 $\tau_1 = (1 + e^{1-k})/2$ 、 $k = 1.66$ (ヘリウムに相当) とした本計算を太線で、 $\tau_1 = 1$ とした前報の計算を細線で示す。図中のパラメータは温度比 τ である。本法の方が前法より L_i^{**} が1~2割程小さくなり、しかも L_i^{**} を最大にする $\Delta\theta$ が 10° 位大きい方に移動し、

100° 前後の値となっていることが分かる。

4.2 行程容積の影響

行程容積比 κ が図示仕事に及ぼす影響の1例を図2に示す。計算条件は $X_2 = 0.3$ 、 $X_3 = 0.5$ 、 $X_4 = 0.3$ 、 $\Delta\theta = 90^\circ$ で、太線は $k = 1.66$ に対する τ_1 を用いた本法、細線は $\tau_1 = 1$ とした前報の方法を示す。前者は後者より1~2割 L_i^{**} が小さくなっているが、全体の傾向に大

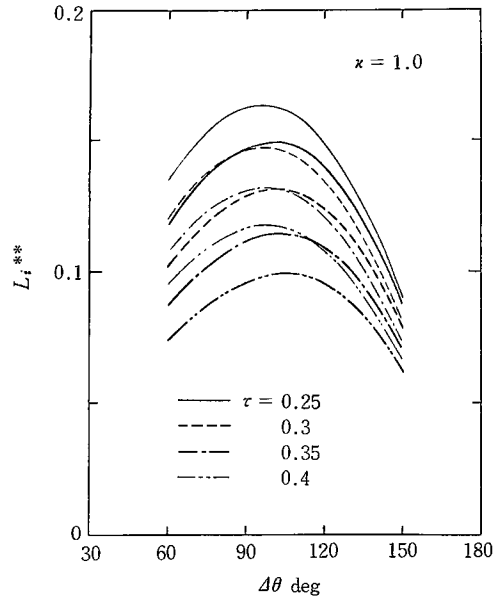


図1 位相差の影響 ($L_i^{**} \sim \Delta\theta$)

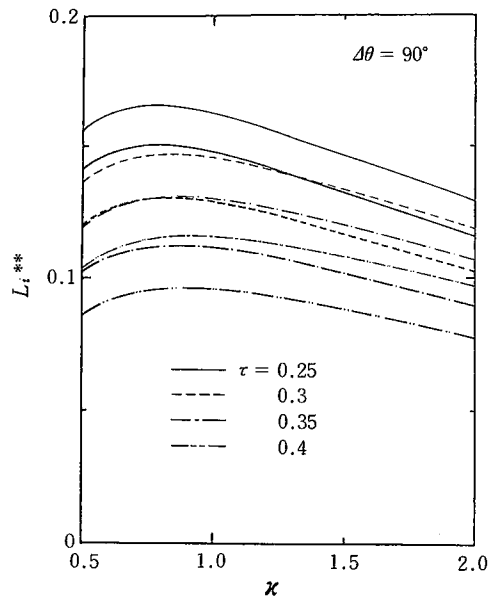


図2 行程容積の影響 ($L_i^{**} \sim \kappa$)

研究速報

きな差はない。

4.3 熱交換器容積の影響

加熱器などの熱交換器部の死容積が図示仕事に及ぼす影響を図3に示す。ここでは $\kappa=1.0$, $\Delta\theta=90^\circ$, $\tau=0.3$ の場合を扱い、加熱器容積の影響は $X_3=0.3$, $X_4=0.3$ (実線), 再生器容積の影響は $X_2=0.3$, $X_4=0.3$ (一点鎖線), 冷却器容積の影響は $X_2=0.3$, $X_3=0.3$ (破線) としてそれぞれの死容積比 X_2, X_3, X_4 のみを変えて求めた結果であり、本法は太線、前法は細線で示している。図より、どの容積も大きくなると図示仕事小さくなり、特に冷却器容積の影響が大きいたることが分かる。また、本法による方が前法によるものより死容積比の影響が小さいことも分かる。

次に、前報と同様に死容積を機関圧縮比 ϵ の形に整理し、これと図示仕事との関係にして図4に示す。この例は $\kappa=1.0$, $X_3=0.5$, $\Delta\theta=90^\circ$, $\tau=0.3$ の場合で、実線は加熱器容積のみを変えた場合、破線は逆に冷却器容積のみを変えた場合を示している。全体の傾向は前報の図6と同様である。

4.4 断熱膨張温度の圧力変動に及ぼす影響

本方法は膨張室温度を加熱器温度と同じにせず、断熱膨張温度を考慮して式(4)のように仮定した。これまでに機関各要素の容積や位相差が機関出力に及ぼす影響を及ぼすかについて述べてきた。ここで、本計算法と前報の計算の両者について圧力変動すなわち $p-V$ 線図を示すと図5となる。代表例として $\kappa=1.0$, $X_2=0.3$, $X_3=0.5$, $X_4=0.3$, $\Delta\theta=90^\circ$, $\tau=0.3$ の場合を示して

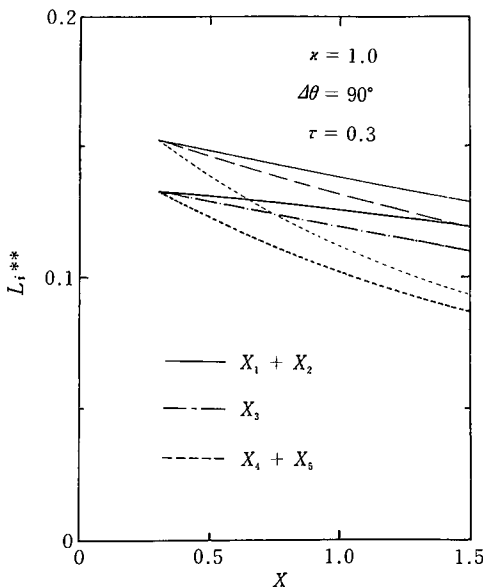


図3 死容積の影響 ($L_i^{**} \sim X$)

おり、太線は $\tau_1=(1+\epsilon^{1-\kappa})/2$, $k=1.66$ とした本計算法の結果、細線は $\tau_1=1$ とした前報の計算結果である。図中、実線は機関全体容積に対するもの、一点鎖線は膨張ピストンに対するもの、破線は圧縮ピストンに対するものである。ここで、横軸は容積 $V^*=V/V_E$, 縦軸は圧力 $p^*=p/p_{ref}$, $p_{ref}=MRT_H/V_E$ を表す。図より、本法の方が膨張ピストンおよび全体容積に対する $p-V$ 線図は面積が小さくなり、圧縮ピストンの線図面積が大きくなること分かる。これは断熱膨張温度を考慮した計算では膨張仕事小さく、圧縮仕事大きくなり、その結果図示仕事が低下することを示すものである。

4.5 比熱比の影響

以上はヘリウムに相当する比熱比 $k=1.66$ の場合であるが、比熱比が図示仕事に及ぼす影響の1例に L_i^{**}

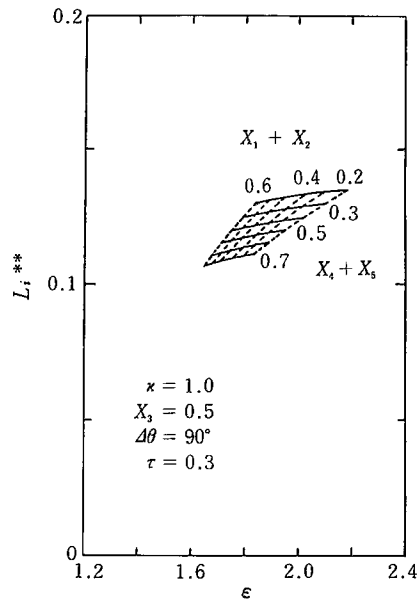


図4 圧縮比の影響 ($L_i^{**} \sim \epsilon$)

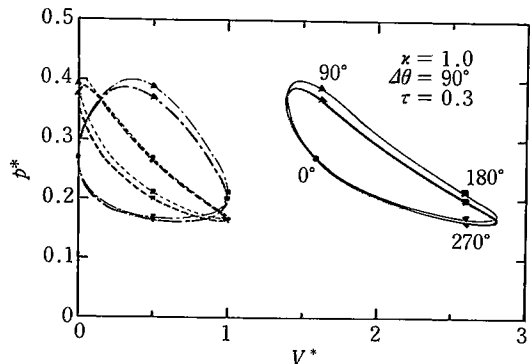


図5 p^*-V^* 線図

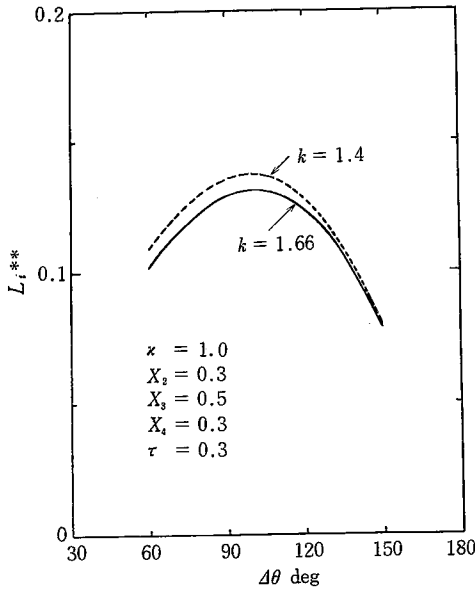


図6 位相差の影響 ($L_i^{**} \sim \Delta\theta$)

と $\Delta\theta$ の関係を図6に示す。計算条件は $\kappa=1.0$, $X_2=0.3$, $X_3=0.5$, $X_4=0.3$, $\tau=0.3$ で、図中の実線は $k=1.66$ の場合、破線は $k=1.4$ の場合である。図よ

り、同一形状の機関では k の小さい方が L_i^{**} が大きくなり、また L_i^{**} の最大値を与える $\Delta\theta$ は k の小さい方が 90° に近いことが分かる。図には示さなかったが、図2, 3に対応する結果をみると全体の傾向はほとんど同じであるが、 k が小さい方が L_i^{**} が大きくなること分かる。この理由は、 k が小さいと T_1 の温度低下が小さくすむからである。

5. むすび

前報の計算では膨張室内流体温度 T_1 を加熱器内流体温度 T_2 と同一にしたため、実際の機関出力に比べてかなり大きな値を示すことが分かった。本報では実際の機関の T_1 が T_2 より低下していることを考慮し、実際の出力に近い値を予測する方法として、 T_1 は T_2 と $T_2 \times e^{-k}$ との平均温度に保たれるものと仮定した。その結果、今回の計算値は前回の計算値に比べて、図示出力 L_i^{**} が約1~2割減少し、実際の出力により近い値を予測できることが分かった。(1980年6月20日受理)

参考文献

1) 吉識ほか2名：生産研究，vol. 32，No 8，1980

次号予告(10月号)

退官記念講演	
金属材料と35年.....	西川 精一
研究速報	
新離散化モデルによる地盤基礎の極限解析(その4) —たわみ性土留壁—	{ 川井 忠彦 竹内 則雄
塑性変形のサブレイヤモデルについて.....	{ 山田 嘉昭 黄 佑民
急拡大管における水中噴流の挙動に関する実験的研究 (第2報 管壁圧力分布と脈動流)	{ 小林 敏雄 蛭田 雅彦 佐賀 徹彦
土のねじり単純せん断試験(Ⅰ) —試験機の開発—	{ 福島 伸二 龍岡 文夫
オージェ電子分光における波形情報の正確さ —特に変調電圧の影響について—	{ 田中 彰博 本間 禎一
予引張あるいは予圧縮ばねを利用した免震床の研究 (第2報 振動特性と免震性能—その2—)	藤田 隆史
繊維強化複合材料の開発 —異方積層複合材料の強度—	{ 大蔵 明光 本寺 紘一 寺沢 優一
コンクリートからの後方散乱ガンマ線を低減させる表面材の研究(Ⅲ).....	{ 斉藤 秀雄 佐藤 乙丸
スターリング機関の機関性能の簡易予測法(第3報) —断熱膨張温度、断熱圧縮温度を考慮した場合—	{ 吉識 晴夫 高上 信光 村松 宏
高炉水砕スラグ・セッコウ系結合材を用いたコンクリート に関する基礎的研究(Ⅺ) —結合材の風化とその対策—	{ 魚本 健人 小星 一夫 小林 富夫