振り子式ディスプレイサを有するスターリング
エンジンに関する研究*一色 誠 太^{*1}, 一色 尚 次^{*2}, 井 川 義 春^{*3}

Studies on Stirling Engine with Pendulum-Type Displacer

Seita ISSHIKI, Naotsugu ISSHIKI and Yoshiharu IGAWA

This paper describes in detail the experimental and theoretical results of a new type of Stirling engine with a pendulum-type displacer (PDSE) that is suspended by a hinge shaft and swings in a displacer space. The main features of PDSE are its simplicity, ease of outside gas sealing, and lower mechanical friction than that of the conventional-type Stirling engine. However, gas leakage inside the displacer is larger than that of the conventional type. The power required to induce a pendulum-type displacer motion, which consists of flow loss powers of multiple fin gas passage and regenerator wire mesh, is analyzed using a simple equation. It has been clarified that the calculated theoretical power output agreed well with the experimental power output. It has also been clarified that the measured Nusselt number of the regenerator agreed with that of a previous study. It is hoped that PDSE can be employed to utilize natural heat energy sources in the future.

Key Words: Stirling Engine, Heat Transfer, Kinetics, Displacer Design, Flow Resistance

1. 緒 言

近年地球環境保全と将来エネルギー対策の見地からスターリング機器に関する研究が盛んになってきた。本研究では、ディスプレイサの形式を振り子形にしたスターリングエンジン(PDSE)を新たに提案し⁽¹⁾⁽²⁾, その特性と諸性能について実験的および理論的に明らかにする。このスターリングエンジンは、振り子式ディスプレイサをディスプレイサ室内で左右に動かすことにより作動ガスを高温側と低温側の間を往復運動させるものである。著者らはこれまでに3種類のPDSEを試作してきた。PDSE-1とPDSE-2は完全な気密性の保持のため、パワーピストンにゴムのベローズを使用した予備的なエンジンである。PDSE-3Bは定置式太陽熱収熱器による温水を熱源とすることを目標とした本格的なもので、特に各部の流動抵抗による振り子式ディスプレイサのよう動動仕事の理論解析、理論出力と実測出力を比較した。またリジェネレータのヌッセルト数を測定し従来の研究と比較した。これらの

PDSEの主要諸元を表1に示す。ディスプレイサメントの大きさは300~2000 cc, 軸出力は0.6~30 Wの範囲である。これらのエンジンの特徴は、作動ガスの外部漏れをよく防止できることと製作の容易な点であ

Table 1 Specifications of PDSE1-3B

	Symbols	PDSE-1	PDSE-2	PDSE-3B
Displacer volume	V_d [cc]	330	288	2000
Expansion volume	V_e [cc]	122	113	1410
Regenerator volume	V_r [cc]	68	107	860
Dead space ratio	a	0.28	0.67	0.5
Working gas		Air	Helium	Air
Source temp. (RG)	T_h [°C]	160	180	(250)
Sink temp. (RG)	T_k [°C]	20	20	(80)
Temperature ratio	γ	1.47	1.54	1.48
Max speed	n [rpm]	140	600	500
Total heat source	Q [W]	280	300	2000
Indicated power	P_{ind} [W]	2.5	---	60
Efficiency (ind)	η_{ind} [%]	(0.7)	0.2	(3)
Engine power	P_{ena} [W]	---	0.6	30

* 原稿受付 1995年4月17日。

^{*1} 正員, 一色技研 (〒156 東京都世田谷区経堂 2-29-6)。^{*2} 正員, 日本大学工学部 (〒963 郡山市田村町徳定字中河原 1)。^{*3} シロキ工業(株) (〒442 豊川市千両町下野市場 35-1)。

り, 教材用あるいは将来の低温度差の自然エネルギーの低価格な有効利用に適していると考えられる。

記 号

A : 断面積 m^2	g : 作動ガス
A_{wgr} : リジェネレータメッシュの全表面積 m^2	h : リジェネレータの高温側
a : 平均死空間比	hy : メッシュの水力直径
b : 装置定数	ind : 図示出力
c : 装置定数, 比熱 $\text{J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$	k : リジェネレータの低温側
d : 直径 m	r : リジェネレータ流路
$freq$: 作動周波数 Hz	th : 理論値
k : 熱電対の感度	w : 熱電対
l_f : ひれ流路の長さ	
l_r : メッシュの目開き m	
n : 回転数 rpm , メッシュの積層枚数	
Ntu : 伝熱ユニット数	
Nu : ヌッセルト数	
P : 損失仕事, エンジン出力 W	
p_{mean} : 作動ガスの平均圧力 Pa	
Re : レイノルズ数	
T : 温度	
u : 作動ガス流速 m/s	
V : 作動ガス流量 m^3/s	
V_0 : ディスプレースメント m^3	
V_e : ピストンの膨張容積 m^3	
α : 熱伝達率 $\text{W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$	
α_1 : 長方形断面の流路摩擦の修正係数	
α_2 : 動圧損失係数	
β : メッシュの開口比	
γ : 温度比	
Δp : 圧力損失 Pa	
ΔT : 温度変動 K	
ε : 作動ガスの漏れ流量比	
θ : 温度 $\text{K}, ^\circ\text{C}$	
λ : 層流の流路摩擦係数, 熱伝導率 $\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$	
μ : 作動ガスの粘性係数 $\text{Pa}\cdot\text{s}$	
ν : 作動ガスの動粘性係数 m^2/s	
ρ : 密度 kg/m^3	
ω : 角速度 $(=2\pi freq)$ rad/s	
添 字	
dis : ディスプレーサの運動	
e : 膨張空間	
eng : エンジン出力	
est : 推算値	
ex : 実測値	
f : ひれ流路	

2. PDSE-1 と PDSE-2 の構造と性能

2-1 PDSE-1 の構造と性能 図1に初期に製作したPDSE-1の断面図を示す。ディスプレイサは平行平板形の真ちゅう板製で、メッシュ層を入れたリジェネレータが付いている。ディスプレイサ箱も三角形の真ちゅう板製で、内側に伝熱フィンが加工された加熱板と伝熱フィンの付いた冷却箱よりなる。ディスプレイサは横から出した小さな軸を半回転することによりよう動かせる。従来のピストン形式のディスプレイサと比較すると、複雑なロッドシールを必要としないので、外部へのシーリングが簡単である。またPDSEのディスプレイサのほうが機械摩擦が小さい。本機ではパワーピストンのゴムベローズと90°位相差でディスプレイサが左右によう動するメカニズムになっている。しかしながらディスプレイサ板のまわりのギャップを通る作動ガスの内部漏れが大きいこととディスプレイサ箱の壁面を通る熱伝導損失が大きい短所がある。図示仕事は2.5 W, 図示効率は0.7%の結果が得られた。

2-2 PDSE-2 の構造と性能 図2にPDSE-2の断面図を示す。本機は特に製作の簡単なことと気密性のよいことを目標として試作した。ディスプレイサは平行平板形のバルサ板でできている。ディスプレイサ箱は直方体形で外壁は木材でできて、銅板製の加熱板

Fig. 1 Section of PDSE-1

Fig. 2 Section of PDSE-2

Fig. 3 Free rotational speed with Helium and air

と水冷箱がディスプレイサ箱をはさむ構造となっている。パワーピストンは気密のゴムベローズが使用されている。ディスプレイサをよう動するロッド軸端には小さいシーリングゴムベローズを付けて作動ガスの完全な密閉を実現した。図3に空気とヘリウムガスによる回転数の比較を示す。図3には加熱板の温度に対する無負荷時回転数の挙動が表されている。このエンジンは作動ガスがヘリウムと空気の両方の場合ともに175°Cで回転を始めるが、ヘリウムの場合は回転数が急激に増加し空気の場合の約2倍に到達する。加熱を止めると回転数は徐々に減少するが、ヘリウムのほうが回転数が高い。この実験結果は、このPDSEは大気圧でも作動ガスをヘリウムあるいは水素に置き換える運転ができることを示したものである。またPDSE-1とPDSE-2は、これにより極めて低価格のスターリングエンジンが容易に作れることを明らかにした。

Fig. 4 Section of PDSE-3B

3. PDSE-3Bの構造と性能

3.1 PDSE-3Bの構造 以上二つのPDSEの予備的な研究結果に基づいて、特に定置収熱式太陽熱温水器による温水(150°C)を熱源とする簡易なスターリングエンジンの試作を行うためPDSE-3Bを製作した。図4にPDSE-3Bの構造を示す。図示するようにこれは加熱部を底にする垂直形のエンジンであり、低温用のためパルサ製の三角形のディスプレイサが長方形のディスプレイサ箱内に水平に納められている。外側のガス通路にリジェネレータが設置されている。8個のリニヤサイドローラで直線運動を保持されたパワーピストンが冷却システムの上に設置されている。リジェネレータは、メッシュを多数積層したものからなる。伝熱効率向上のため加熱部は幅1.5mm、高さ15mm、長さ98.5mmのひれを100枚並べた通路に、冷却部も幅2mm、高さ14mm、長さ30mmのひれを75枚並べた通路にしてある。内部漏れを減らすためディスプレイサの先端にはテフロン製のワイパ状シール板が取付けてある。

3.2 PDSE-3Bの流動抵抗理論解析 まずPDSEの理論出力を考察するが、それと発生出力の差は主として流動抵抗と内部漏れによることは明らかであるので、まず流動抵抗の理論解析を行う。加熱部のひれ流路と冷却部のひれ流路の流れは長方形流路の管内層流流れに近似できる。振り子式ディスプレイサの運動に基づく通気流量は次式で示される。

$$V=0.5 V_0(1-\varepsilon)\omega \cos \omega t \quad \cdots \cdots (1)$$

ひれ流路のガス流速は,

$$u_f = \frac{V_0 \text{freq}}{A_f} (1-\varepsilon) \cos \omega t \quad \cdots \cdots (2)$$

長方形流路のレイノルズ数は,

$$Re_f = |u_f| d_f / \nu \quad \cdots \cdots (3)$$

ひれ内部の流れは層流であるので, 抵抗係数 λ は,

$$\lambda = 64 \alpha_1 / Re_f \quad \cdots \cdots (4)$$

ここで, α_1 は長方形流路の修正係数⁽³⁾である。ひれ流路の流動抵抗は, 流路損失と出入口動圧損失の和であるので,

$$\Delta p_f = \lambda \frac{\rho |u_f| u_f}{2} \left(\frac{l_f}{d_f} \right) + \alpha_2 \frac{1}{2} \rho |u_f| u_f \quad \cdots \cdots (5)$$

式(5)に式(2)~(4)を代入整理すると,

$$\Delta p_f = \text{freq} (1-\varepsilon) \cos \omega t \times \{b_1 \mu + b_2 \rho \text{freq} (1-\varepsilon) |\cos \omega t|\} \quad \cdots \cdots (6)$$

ここで, b_1 は粘性による圧力損失係数, b_2 は慣性による圧力損失係数を示す。式(6)は, ひれ流路の流動抵抗 Δp_f が作動周波数に比例する粘性項と作動周波数の二乗に比例する慣性項から成立することを意味する。ひれの流動抵抗損失仕事は, 次式のように通気流量と流動抵抗を積分すると得られる。

$$P_f = 4 \text{freq} \cdot \int_0^{\pi/2\omega} V \cdot \Delta p_f dt \quad \cdots \cdots (7)$$

式(7)に式(5), (6)を代入整理すると次式が得られる。

$$P_f = (1-\varepsilon)^2 \text{freq}^2 \{c_1 \mu + c_2 \rho (1-\varepsilon) \text{freq}\} \quad \cdots \cdots (8)$$

$$c_1 = \frac{16\pi^2 \alpha_1 l_f V_0^2}{A_f d_f^2} \quad [\text{m}^3] \quad \cdots \cdots (9)$$

$$c_2 = \frac{2\pi^2 \alpha_2 V_0^3}{3A_f^2} \quad [\text{m}^5] \quad \cdots \cdots (10)$$

ここで, c_1, c_2 はひれ流路の形状とディスプレイサメントだけで求めることのできる装置定数であり, ひれ流路の損失仕事は作動周波数の二乗に比例する粘性項と作動周波数の三乗に比例する慣性項から成り立つことを示す。

次にリジェネレータの流動抵抗仕事の理論解析を示す。メッシュを通る流速は,

$$u_r = \frac{\pi V_0 \text{freq}}{\beta A_r} (1-\varepsilon) \cos \omega t \quad \cdots \cdots (11)$$

メッシュを通るレイノルズ数は,

$$Re_r = |u_r| l_r / \nu \quad \cdots \cdots (12)$$

浜口の式⁽⁴⁾より, リジェネレータの流動抵抗は,

$$\Delta p_r = \left(\frac{33.6}{Re_r} + 0.337 \right) \frac{\rho |u_r| u_r n}{2} \quad \cdots \cdots (13)$$

式(13)に式(11)~(12)を代入整理すると,

$$\Delta p_r = \text{freq} (1-\varepsilon) \cos \omega t$$

$$\times \{b_3 \mu + b_4 \rho \text{freq} (1-\varepsilon) |\cos \omega t|\} \quad \cdots \cdots (14)$$

ここで, b_3, b_4 は各寸法より決まる装置定数である。式(14)は, リジェネレータの流動抵抗 Δp_r も作動周波数に比例する粘性項と作動周波数の二乗に比例する慣性項から成立することを意味する。リジェネレータの流動抵抗損失仕事は, 式(8)と同様に積分すると得られて,

$$P_r = (1-\varepsilon)^2 \text{freq}^2 \{c_3 \mu + c_4 \rho (1-\varepsilon) \text{freq}\} \quad \cdots \cdots (15)$$

$$c_3 = \frac{8.4\pi^2 n V_0^2}{\beta A_r l_r} \quad [\text{m}^3] \quad \cdots \cdots (16)$$

$$c_4 = \frac{0.224 7\pi^2 n V_0^3}{\beta^2 A_r^2} \quad [\text{m}^5] \quad \cdots \cdots (17)$$

ここで, c_3, c_4 はメッシュとメッシュ流路の形状, ディスプレースメント (V_0) によってのみ決まる装置定数である。

3.3 PDSE-3 Bのディスプレイサのよう動仕事

結局振り子式ディスプレイサのよう動仕事 P_{dis} は, 流動抵抗だけで成立するものとして, P_f と P_r の和より,

$$P_{\text{dis}} = (1-\varepsilon)^2 \text{freq}^2 \{c_5 + c_6 (1-\varepsilon) \text{freq}\} \quad \cdots \cdots (18)$$

となる。ただし,

$$c_5 = c_{1h} \mu_h + c_{1c} \mu_c + c_3 \mu_r \quad [\text{J} \cdot \text{s}] \quad \cdots \cdots (19)$$

$$c_6 = c_{2h} \rho_h + c_{2c} \rho_c + c_4 \rho_r \quad [\text{J} \cdot \text{s}^2] \quad \cdots \cdots (20)$$

ここで, $c_{1h}, c_{1c}, c_3, c_{2h}, c_{2c}, c_4$ はおのおのヒータのひれ流路, 水冷却部のひれ流路とリジェネレータの流路の装置に固有な定数である。添字の h, c, r はヒータ, 水冷却部とリジェネレータを示す。これらの装置定数は本機では, $c_{1h} = 6569 \text{ m}^3$, $c_{1c} = 1843 \text{ m}^3$, $c_3 = 6520 \text{ m}^3$, $c_{2h} = 0.01055 \text{ m}^5$, $c_{2c} = 0.01212 \text{ m}^5$, $c_4 = 0.05899 \text{ m}^5$ と計算された。 c_5 は作動周波数の二乗に比例する粘性項, c_6 は作動周波数の三乗に比例する慣性項を代表する。非加熱の空気物性値 (1 atm 300 K) を代入すると, $c_5 = 0.278 \text{ J} \cdot \text{s}$, $c_6 = 0.0960 \text{ J} \cdot \text{s}^2$ となった。図5は非加熱の場合のディスプレイサのよう動仕事のトルクメータによる測定結果を示す。回転数が最大の場合の測定値に理論式(18)を代入し, 内部漏れ比を求めると, $\varepsilon = 0.273$ となった。回転数 300 rpm および 400 rpm の実験点と理論線はそれぞれほぼ一致している。このことは, 理論の妥当性を示すものである。なお加熱実験時には, 式(19), (20)より, $c_5 = 0.386 \text{ J} \cdot \text{s}$, $c_6 = 0.0667 \text{ J} \cdot \text{s}^2$ と計算された。

3.4 PDSE-3 Bの発生仕事の理論と実測結果

内部漏れ流量があるため, ディスプレース空間内の高温側と低温側の作動ガスは内部漏れ比の割合だけ混合する。リジェネレータ前後の温度比を $\gamma (= T_h/T_k)$ と

Fig. 5 Power required to provide pendulum type displacer motion

Fig. 6 Power curves of PDSE-3B

すると、実際にディスプレイサに生じている正味の温度比は次式となる。

$$\gamma = (\varepsilon + \gamma') / (1 + \varepsilon \gamma') \quad \dots\dots\dots (21)$$

内部漏れの割合だけ正味のディスプレイサのディスプレイサメントが減少するので、だ円近似法による出力の式⁽⁵⁾において、死空間比 a を $(1 - \varepsilon)$ で割ると次の理論図示出力が得られる。

$$P_{ind-th} = \frac{\pi}{4} freq V_e P_{mean} \frac{(\gamma - 1)}{(\gamma + 1) \{0.5 + a / (1 - \varepsilon)\}} \quad \dots\dots\dots (22)$$

図6にPDSE-3Bの出力線図の一例を示す。図6の横軸に回転数、縦軸に出力を示す。図6中で黒丸印が軸

Fig. 7 Thermocouple probe

出力の実測値である。375 rpm のとき、最大出力 28 W が発生している。白丸印は図示出力の測定値であり、破線は原点と結んだ図示出力の測定曲線 P_{ind-ex} である。点線が測定図示出力からディスプレイサよう動仕事を引いた理論発生出力 $P_{eng-th} (= P_{ind-ex} - P_{dis})$ である。図示出力の測定線は、理論図示出力 P_{ind-th} の一点鎖線より約 2 割低い。回転数 400 rpm 以下で理論発生出力 P_{eng-th} と軸出力 P_{eng-ex} の実線はよく一致している。しかしながら回転数 400 rpm 以上になると、流動抵抗損失仕事だけでは説明できない損失が存在することも明らかとなった。

3・5 リジェネレータ出入口の作動ガス温度変動

実機において測定例の少ないリジェネレータの効率を測定することは、リジェネレータに関する研究に寄与するところが大いと考えられる。そこで本研究では、リジェネレータ出入口の作動ガス温度変動を小形試作熱電対(クロメル-アルメル)プローブで測定した。図7に示すようにプローブは細めた素線を溶接したものである。細めた部分の長さは約 6 mm であり、素線の根元からの熱伝導の影響がほとんどない十分な長さである。素線径は根元で 0.1 mm であり、細めた部分の素線径は約 50 μm であるので、作動ガスの温度変動に対する感度が比較的高い。作動ガスの温度変動 ΔT_g は温度変動の測定値 ΔT_{ex} を数値解析で求めた熱電対の感度係数 k で割って得た。細めた部分の熱電対素線の熱収支に関する 2 階の偏微分方程式を数値解析して熱電対の感度係数 k を得た。その方程式は、熱容量、熱伝導項と熱伝達項の項から成立し、次式で示される。

$$\frac{\pi}{4} d_w^2 \rho_w c_w \frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\pi}{4} d_w^2 \lambda_w \frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2} - \pi \lambda_g Nu_w (\theta - \theta_g) \quad \dots\dots\dots (23)$$

素線のヌッセルト数は Collis らの式⁽⁶⁾を用いた。

$$Nu_w = 0.24 + 0.56 Re_w^{0.45} \quad (0.02 < Re_w < 44) \quad \dots\dots\dots (24)$$

図8に数値計算結果を示す。作動ガスの温度変動は点

Fig. 8 Calculated temperature variations

Fig. 9 One example of measured temperature variation

線で示したように周期的な単位関数に仮定し、熱電対素線の根元での温度変動を無視すると、熱電対の溶接点での温度変動が実線のように計算された。熱電対の感度係数 k は、作動ガスの温度変動に対する熱電対の溶接点での温度変動の振幅の比として得た。図9に試作熱電対プローブによる温度変動の測定値の一例を示す。測定した変動波形はほぼ三角波であり、図8の計算結果の波形と似ている。これより、リジェネレータ前後における作動ガスの温度変動が周期的な単位関数であると仮定した理論解析の結果とよく似ており、その妥当性を示すものと思われる。表2にリジェネレータ出入口での温度変動に関するいろいろな物理量とメッシュの形状を示す。表2のリジェネレータの伝熱ユニット数は次式で定義した。

$$Ntu = \frac{2(T_h - T_k)}{\Delta T_{est}} \quad (25)$$

リジェネレータメッシュの熱伝達率は伝熱ユニット数

Table 2 Performance of regenerator

	Symbols	run1	run3
Rotational speed	n [rpm]	308	499
Hot temp. of RG	T_h [°C]	306	297
Cold temp. of RG	T_k [°C]	93	96
Mean velocity			
inside mesh	u_r [m/s]	2.39	3.87
Reynolds number	Re_{hy}	95	155
Uncertainty	[%]	5	5
Sensitivity			
factor of T.C.	k	0.663	0.524
Temp. variation			
of T.C.			
ΔT_{ex}	[K]	8.95	7.23
ΔT_{est}	[K]	13.51	13.80
RG efficiency	η [%]	94.1	93.6
Heat-transfer			
unit	Ntu	31.6	29.1
ratio	α [W/m ² K]	161	240
Nusselt number	Nu_{hy}	5.90	8.85
Uncertainty	[%]	20	20
Aperture size of mesh : 1.06 [mm] Wire diameter : 0.21 [mm] Hydraulic diameter of mesh : 1.387 [mm] Number of sheets of mesh : 130 Open area ratio (β) : 0.697 Total wetted area of RG : 1.132 [m ²]

Fig. 10 Relation between Nusselt number and Reynolds Number

との関係式⁽⁷⁾を基に、内部漏れの影響を加味すると次式で計算される。

$$\alpha = \frac{V_0 C_0 \rho (1-\varepsilon) \text{freq} Ntu}{A_{wgr}} \dots\dots\dots (26)$$

メッシュ内部を通る往復流れの代表流速を絶対値の平均値と定義すると、式(12)より次式で示される。

$$\bar{u}_r = \frac{2 V_0 \text{freq} (1-\varepsilon)}{\beta A_r} \dots\dots\dots (27)$$

表2には、メッシュの水力直径を代表寸法にとり、式(26)、(27)から計算したレイノルズ数とヌッセルト数を示す。図10にはリジェネレータメッシュのレイノルズ数とヌッセルト数の関係を示す。実験結果は田中らの式⁽⁸⁾と比較した。

$$Nu_{hy} = 0.33 Re_{hy}^{0.67} \dots\dots\dots (28)$$

実験結果は式(28)よりやや小さいが、計測の不確かさの範囲で一致していることが明らかとなった。

4. 結 論

振り子式ディスプレイサを有するスターリングエンジン(PDSE)の実験および理論解析により以下の結論を得た。

(1) 従来のピストン形式のディスプレイサと比較すると、複雑なロッドシールを必要としないので、外部へのシーリングが簡単である。またPDSEのディスプレイサのは機械摩擦が小さく、その損失は流動抵抗だけに近い。

(2) パワーピストンにゴムベローズを使用すれば作動ガスの完全なシーリングが可能であり、かつ各部への木材やプラスチック等の使用で全体を低価格に製作できる。

(3) 内部漏れ損失を考慮したディスプレイサのよう動仕事は回転数の二乗に比例する粘性項と三乗に比例する慣性項により表せる。

(4) 測定図示出力から振り子式ディスプレイサのよう動仕事を引いた理論出力は、軸出力とほぼ一致することが明らかになった。

(5) 作動ガスの温度変動を測定して得られたリジェネレータメッシュのヌッセルト数は従来の研究と不確かさの範囲内で一致した。

(6) 定置太陽熱温水器を熱源とする目標でPDSE-3Bを製作し、350°Cの加熱で約30Wの軸出力を得た。

(7) PDSEは構造が比較的簡単であるのでスターリングエンジンのいろいろな特性や性能の研究に適し、将来は教材用や、低温度差の自然エネルギーの簡易有効利用に向いていると考えられ、以上の研究はそれに資するものとも考えられ、今後さらに性能改善の研究を進めたい。

文 献

- (1) Isshiki, S., Isshiki, N., Takanose, E. and Igawa, Y., *29th IECEC Proc.*, 4(1994), 1930-1934.
- (2) 一色・一色・井川, 日本機械学会第72期通常総会講演会講演論文集(III), (1995), 369-370.
- (3) Kays, W. M. and Crawford, M., *Convective Heat and Mass Transfer*, 2nd ed., (1980), 63, McGraw-Hill.
- (4) 浜口・高橋・宮部, 機論, 48-435, B(1982), 2207-2216.
- (5) 一色, スターリングエンジンの開発, (1982), 48, 工業調査会.
- (6) Collis, D. C. and Williams, M. J., *J. Fluid Mech.*, 6(1959), 357-384.
- (7) 日本機械学会, RC110研究成果報告書, (1994), II-46.
- (8) 田中・山下・千阪, 機論, 55-516, B(1989), 2478-2485.