

円管内往復流動の研究

A Study on Some Periodically Oscillating Flows in a Circular Pipe

吉 識 晴 夫*・鷺 尾 修 司*・遠 藤 敏 彦*

Haruo YOSHIKI, Shuji WASHIO and Toshihiko ENDO

1. は じ め に

スターリング機関は、機関内に高压で封入した水素、ヘリウムなどの作動ガスを熱交換器を通して加熱・冷却することにより、熱を動力に変換する機関である。その長所としては、高い熱効率・多種燃料への適応性・低公害性などがあげられる。

しかし、スターリング機関は熱交換器群を一体に組み込んだクローズドサイクルであるために、その性能は他の熱機関よりも熱交換器群の仕様と性能の影響を直接的に受ける。よって、この機関特有の圧縮、膨張を繰り返す管内振動流の流体力学的性質を理解することが不可欠である。

そこで本研究では、位相差を保ちつつ往復運動する二つのピストンにより両端を閉じられた円管内往復流動装置を用い、熱線流速計によって内部の流れの速度と乱れを三次元的に計測し、管内流の性質を検討する。

2. 三次元乱流計測の原理

まず、熱線流速計の座標系を図1に示す。(ξ, ζ, η)座標系は熱線を基にした相対座標系、(x, y, z)座標系は絶対座標系である。速度成分は大文字が平均成分、小文字が変動成分を表す。熱線のサポート軸に対する偏向角をα, サポートの回転角をψとすると相対座標系は絶対座標系から次のように変換される。

$$\xi = x \cos \alpha + (y \cos \psi - z \sin \psi) \sin \alpha \quad (1)$$

$$\zeta = -x \sin \alpha + (y \cos \psi - z \sin \psi) \cos \alpha \quad (2)$$

$$\eta = y \sin \alpha + z \cos \psi \quad (3)$$

これは直交変換なので速度成分も同様に交換され、

$$U_N = (U+u) \cos \alpha + \{(V+v) \cos \psi - (W+w) \sin \psi\} \sin \alpha \quad (4)$$

$$U_T = -(U+u) \sin \alpha + \{(V+v) \cos \psi - (W+w) \sin \psi\} \cos \alpha \quad (5)$$

$$U_B = (V+v) \sin \alpha + (W+w) \cos \psi \quad (6)$$

と表される。熱線が感じる冷却速度 U_{eff} はこれらの相互作用によるもので、各方向に対する熱線の方向感度 k, h を導入することによって次式で表される。

$$U_{eff}^2 = U_N^2 + k^2 U_T^2 + h^2 U_B^2 \quad (7)$$

また、冷却速度は熱線の検定により、処理装置の出力電圧 E の関数で表される。

$$U_{eff} = f(E) \quad (8)$$

(4)~(8)式より、流速と出力電圧の関係が次式のように求められる。

$$f(E) = \left[\{(U+u) \cos \alpha + \{(V+v) \cos \psi - (W+w) \sin \psi\} \sin \alpha\}^2 + k^2 \{- (U+u) \sin \alpha + \{(V+v) \cos \psi - (W+w) \sin \psi\} \cos \alpha\}^2 + h^2 \{(V+v) \sin \alpha + (W+w) \cos \psi\}^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (9)$$

(9)式を二乗し、時間平均をとると

$$\begin{aligned} \overline{f^2}(E) = & \overline{(U^2 + u^2)} (\cos^2 \alpha + k^2 \sin^2 \alpha) \\ & + \overline{(V^2 + v^2)} (\cos^2 \psi \sin^2 \alpha \\ & + k^2 \cos^2 \psi \cos^2 \alpha + h^2 \sin^2 \psi) \\ & + \overline{(W^2 + w^2)} (\sin^2 \psi \sin^2 \alpha \\ & + k^2 \sin^2 \psi \cos^2 \alpha + h^2 \cos^2 \psi) \\ & + \overline{(UV + uv)} (1 - k^2) \cos \psi \sin 2\alpha \\ & - \overline{(UW + uw)} (1 - k^2) \sin \psi \sin 2\alpha \\ & - \overline{(VW + vw)} (\sin^2 \alpha \\ & + k^2 \cos^2 \alpha - h^2) \sin 2\psi \end{aligned} \quad (10)$$

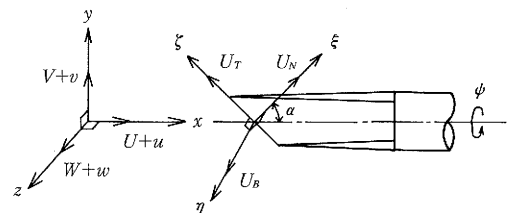


図1 熱線流速計の座標系

*東京大学生産技術研究所 第2部

研究速報

出力電圧の平均成分と変動成分との間には

$$\overline{E^2} = \overline{E}^2 + \overline{e^2} \quad (11)$$

なる関係が成り立つので、(10)式から平均成分に関する項を差し引くことによって変動電圧 $\overline{e^2}$ の式が得られる。

$$\begin{aligned} \overline{f^2}(e) = & \overline{u^2}(\cos^2\alpha + k^2\sin^2\alpha) \\ & + \overline{v^2}(\cos^2\psi\sin^2\alpha + k^2\cos^2\psi\cos^2\alpha \\ & + h^2\sin^2\psi) + \overline{w^2}(\sin^2\psi\sin^2\alpha \\ & + k^2\sin^2\psi\cos^2\alpha + h^2\cos^2\psi) \\ & + \overline{uv}(1 - k^2)\cos\psi\sin 2\alpha \\ & - \overline{uw}(1 - k^2)\sin\psi\sin 2\alpha \\ & - \overline{vw}(\sin^2\alpha + k^2\cos^2\alpha - h^2)\sin 2\psi \quad (12) \end{aligned}$$

(10), (12)式から、回転角 ψ , あるいは偏向角 α を変えることにより得られる式を連立させて解くことができる。

感度係数については以下のようにして求めた。相対座標系と流速の関係を図2に示す。(7)式において $\theta = 0^\circ$, $\phi = 0^\circ$ の場合を考えると、それぞれ次のような式で表される。

$$\begin{aligned} \theta = 0^\circ : \\ U_{eff}^2(\phi) = U^2(0)(\cos^2\phi + k^2\sin^2\phi) \quad (13) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \phi = 0^\circ : \\ U_{eff}^2(\theta) = U^2(0)(\cos^2\theta + h^2\sin^2\theta) \quad (14) \end{aligned}$$

これらの式と(8)式とから感度係数 k, h は

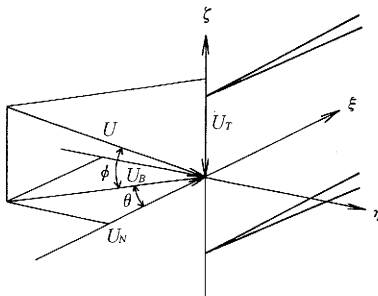


図2 相対座標系と流速の関係

$$k = \frac{1}{\sin\phi} \left\{ \frac{f^2(E(\phi))}{f^2(E(0))} - \cos^2\phi \right\}^{\frac{1}{2}} \quad (15)$$

$$h = \frac{1}{\sin\theta} \left\{ \frac{f^2(E(\theta))}{f^2(E(0))} - \cos^2\theta \right\}^{\frac{1}{2}} \quad (16)$$

のように求められる。このように熱線の感度係数はサポート等の影響を受け、 ϕ, θ や流速の関数となる。しかし、それぞれ $\phi = 90^\circ, \theta = 90^\circ$ での値を用いることにより誤差が最小になることが知られており²⁾、本研究でもその値を採用した。

3. 実験装置および実験方法

実験装置の概要を図3に示す³⁾。内径 $D=160\text{mm}$ のシリンダとピストン・クランク機構をA, B 2組用いて、往復流を発生させる。管内径 $d=40\text{mm}$, 直管部長さ4mの塩化ビニール管2本をU字状に接続し、これを二つのシリンダにベルマウスを介して接続し、水平管として配置している。クランク軸回転数 N およびクランク角 θ は光電式ピックアップにより、また、シリンダ内圧力は半導体圧力変換器により検出した。内部流体は常温常圧の空気である。

測定位置は主にST.2で、半径方向に数点(円管中心からの距離 $r=0\sim 18\text{mm}$)トラバースした。実験は傾斜型熱線($\alpha=45^\circ$)をサポート軸の回りに回転させた8状態($\psi=45^\circ, 65^\circ, 90^\circ, 135^\circ, 225^\circ, 245^\circ, 270^\circ, 315^\circ$)とI型熱線によるもの($\alpha=0^\circ, \psi=0^\circ$)との計9状態で1周期につき50~62点の測定を行い、500周期のデータから最小二乗法によって解を求めた。

実験条件は表1のように行程 S , 回転数 N , 位相差 $\Delta\theta$ を組み合わせて行った。なお、位相差とはAピストンに対するBピストンのクランク角の進みとする。また、断面平均の最大軸方向速度 V_b と軸方向速度 V_m はピストン平均速度より次式で算出した。

$$V_b = \pi V_m / 2 = S\omega A r / 2 \quad (17)$$

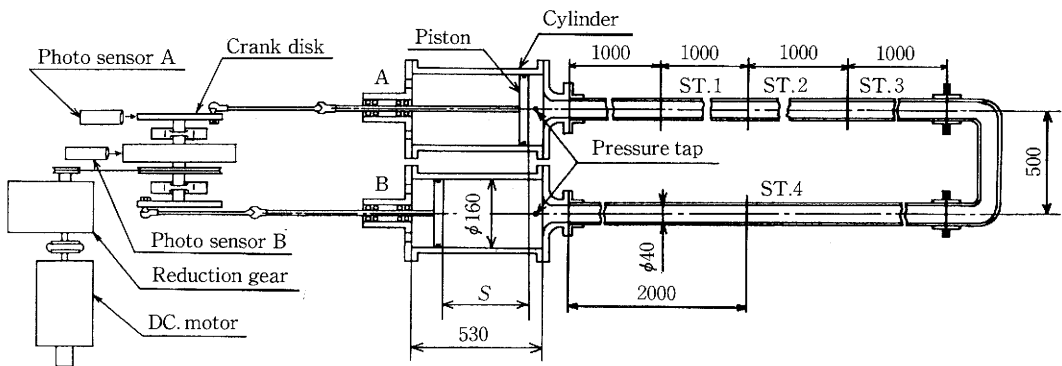
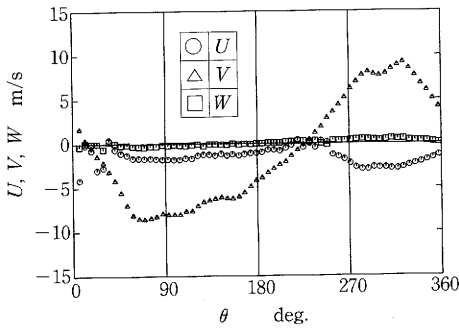


図3 実験装置概要

表1 実験条件

実験番号	位相差 $\Delta\theta$	ストローク S mm	回転数 N rpm	測定位置 ST.	無次元振動数 $R^2\omega/\nu$	最大軸方向速度 V_b m/s	レイノルズ数 $Re = V_b d/\nu$	断面平均軸方向速度 V_m m/s	$Rem = V_m d/\nu$
1	180	140	120	2	354	14.1	39600	8.96	25200
2	90	140	120	2	354				
3	180	210	80	2	236				
4	120	210	80	2	236				
5	90	210	80	2	236				
6	180	210	120	2	354	21.1	59400	13.44	37900
7	90	210	120	2	354				
8	180	280	60	2	177	14.1	39600	8.96	25200
9	180	210	80	1	236				
10	90	210	80	1	236				
11	180	210	80	3	236				
12	90	210	80	3	236				



(a)速度成分

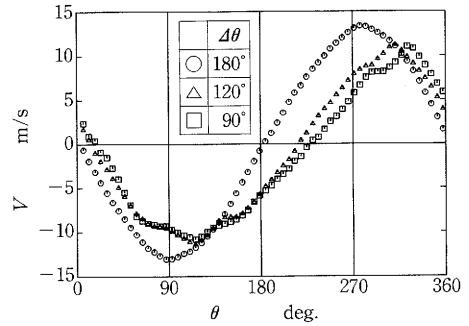
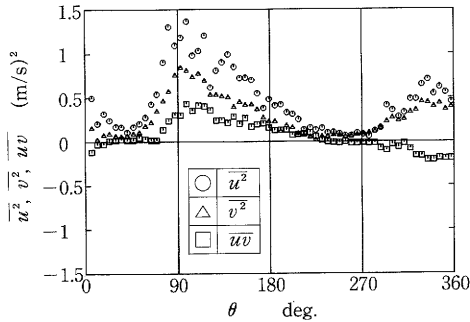


図5 位相差の影響

($S=210\text{mm}$, $N=80\text{rpm}$, $ST. 2$, $r=0\text{mm}$)



(b)乱れ成分

図4 速度と乱れの変化

($\Delta\theta=90^\circ$, $S=210\text{mm}$, $N=80\text{rpm}$, $ST. 2$, $r=18\text{mm}$)

4. 実験結果および考察

実験結果の一例として、図4に1周期における各速度成分と乱れの各成分の変化を示す。Aピストンの上死点をクランク角 $\theta=0^\circ$ 、軸方向速度 V はAシリンダより流出する方向を、半径方向速度 U は管壁から管中心方向を正と定める。旋回成分 W に関する速度や乱れはほとんどの測定条件で他の成分と比べて小さかったため図4(b)では省略した。半径方向速度は軸方向速度の増加にともないほぼ比例して増加するが、サポートの影響もあって乱れが大きく、特に壁面付近の減速域で顕著である。また、軸方向流は位相差が 90° であるため負方向の減速域の期間が長い非対称な流れとなる。このことは位相差の影響を示した図5より明らかである。しかし、その他の負方向の増速域や正方向流では位相差によらず同ような速度変化をしており、乱れも小さかった。ここは管内圧

$\omega = 2\pi N/60$: クランク軸回転角速度
 $Ar = 16$: シリンダと管の断面積比

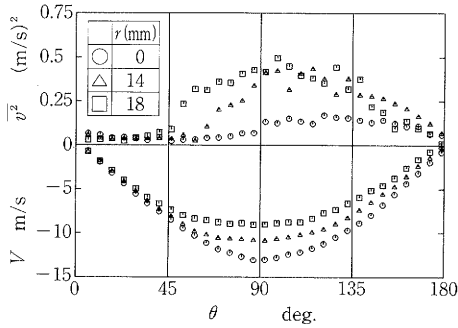


図 6 速度と乱れの分布
($\Delta\theta=180^\circ$, $S=210\text{mm}$, $N=80\text{rpm}$, $ST. 2$)

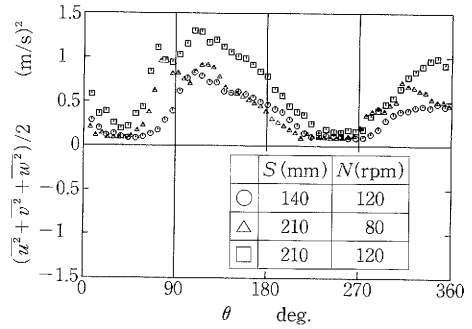


図 7 乱流エネルギー
($\Delta\theta=90^\circ$, $ST. 2$, $r=18\text{mm}$)

力が正または増速域であるため、乱れが抑制されると考えられる。なお、 $\theta=300^\circ$ 付近のへこみは管内が最高圧になる位相であり、漏れが原因である。

図 6 は軸流の乱れが大になる位相とその時の流れの速度変化を、半径方向の三点について比べたものである。このように管壁から半径方向に速度勾配ができ、乱れが大きくなっていくことがわかる。乱れが管壁から中心へと広がっていくことは、すべての測定条件における他の乱れ成分についても同様であったが、速度勾配との関係は位相差が 180° 以外のものでは明瞭でなかった。

図 7 は測定条件の差に対する乱れの影響を、位相差 90° において回転数とストロークを変えた三条件の乱流エネルギー $k = (\overline{u^2} + \overline{v^2} + \overline{w^2})/2$ で示したものである。レイノルズ数が同じ場合は、管壁から中心への乱れの伝わり方と乱れが急に大きくなる位相を除いた乱流エネルギーがほぼ同じである。これはたとえばストロークが長く回転数が小さくなった場合、半径方向流の乱れが大きくなり、軸方向流の乱れは小さくなるからである。ストロークが同じで回転数が増える場合は、乱れの各成分はそれぞれ大きくなるが、乱れ度はかえって小さくなる。回転数が同じでストロークが長くなる場合は、乱れが急に大きくなる位相が顕著に早くなり、また半径方向に伝わる時期も早くなる。これは位相差 180° のときにはほとんど変わらないことから、管内圧が低下し乱れを促進したと考えられる。

測定場所による乱れの違いは、ピストンに近いST. 1で

の半径方向の乱れが大きかったほかはあまり差はみられなかった。

5. ま と め

傾斜型熱線を回転させるため空間分解能は余り良くないが、管内往復流の速度と乱れの三次元成分を求め流れの状態を知ることができた。そして、レイノルズ数 $Re = 39600, 59400$, 無次元振動数 $\omega = 177, 236, 354$ の範囲の実験により以下のことが明らかになった。

- ① この往復流動装置の測定位置ST. 2 (管径 $\times 50$)では旋回成分は小さく、管内流は二次元流と考えられる。
- ② 管内の乱れは管壁から拡大し中心部へと伝わる。その拡大する位相や伝わり方は管内流の加速度や管内圧の影響が強い。特に、 90° 位相差では同じレイノルズ数での熱交換器の性能向上を考えた場合、回転数とストロークの間に最適値があるようである。
- ③ 乱れの相関 \overline{uv} はピストン位相差にかかわらず、流れの減速域において半径位置 $r=14\text{mm}$ と 18mm ではほぼ同じ大きさになる。
- ④ 測定位置ST. 1ではピストンの影響を受け、乱れは大きくなる。

(1989年3月25日受理)

参 考 文 献

- 1) M. Acrivlellis, DISA Information, (1978), 11
- 2) 林良生, 中谷輝臣, 航技研報告, 242 (1971), 1
- 3) 吉識, 津村, ほか 2 名, 機論, 52-483, B (昭61), 3650