

強制対流熱伝達に及ぼす周囲の影響

— 円柱の場合 — (第 1 報)

相 場 真 也

Influence of surroundings for heat transfer in forced flow

— in case of a cylinder — (1st Report)

Sinya AIBA

1 緒 言

強制対流下において、流れに直角に置かれた単円柱の表面からの熱伝達については、すでに多くの研究がなされている。しかし、大部分の研究は流体力学的に理想的な流れの場におけるものであり、周囲の条件を含めたものは比較的少ない。

筆者は、流れに対して直角に、しかも水平面に同直径の円柱をおき、流れに向かって前方の円柱の表面からの熱伝達への後方円柱による影響を調査し、以下に述べるような結果を得たので報告する。

2 実験方法及び装置

2.1 熱伝達率の測定

実験は 250 mm ϕ の断面をもつ風洞を用い、図 1 のように、流れに直角に外径 26 mm ϕ のビニール管を 2 本平行におき、流れに向かって前方の円柱 (以下供試円柱という) に厚さ 50 μ 、巾 20 mm、長さ 424 mm のステンレス箔を 5 巻巻き、通電加熱し、熱流束一定の条件で放熱せしめた。表面温度はステンレス箔の裏面に直径 0.065 mm の Cu-Co 熱電対を接着し測定した。なお測定は 3 巻きめのニクロム箔、すなわち、中央のニクロム箔の位置で、おこなった。また、管内は石綿で充填した。

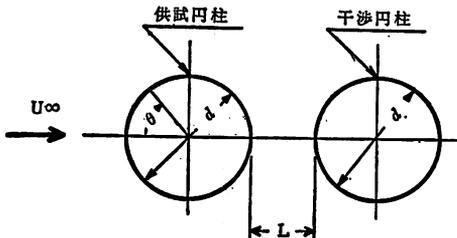


図 1

他方の円柱 (以下干渉円柱という) は供試円柱と同直径で、加熱はしなかった。

2.2 圧力分布の測定

供試円柱と干渉円柱間の距離 L によって、圧力分布、抗力係数がいかに変化し、また熱伝達率の変化との関係を調べる目的で、円柱まわりの圧力を測定した。すなわち、上記風洞で外径 26 mm ϕ の黄銅製の供試円柱に直径 1 mm ϕ の測定孔を設け、円柱を 5° ~ 10° づつ回転させて、表面の圧力を測定した。なお、干渉円柱は外径 26 mm ϕ のビニール管を用いた。

3 実験結果

3.1 熱伝達率の整理

供試円柱表面温度を角度 15° 間隔で測定し、主流温度との差を求め、GIEDT 等による方法で局所熱伝達率 α_{θ} を求めた。

すなわち、図 2 に示したように、ステンレス箔の微小長さの定常状態における熱収支を考えると (1) 式が成立する。

$$0.86 \cdot i^2 \cdot R \cdot dx + \{ -\lambda p \cdot s \cdot e (dt/dx) \} \\ = -\lambda p \cdot s \cdot e \{ (dt/dx) + \frac{d}{dx} (dt/dx) dx \} \\ + \alpha_{\theta} \cdot e \cdot dx (t_w - t_{\infty}) + q_{\text{grad}}/A \cdot e \cdot dx + \\ q_{\text{cond}}/A \cdot e \cdot dx \dots \dots \dots (1)$$

$$\therefore \alpha_{\theta} = \{ 0.86 \cdot i^2 \cdot R/e + \lambda p \cdot s \cdot e \cdot r^2 \cdot \frac{d^2 t}{dx^2} - q_{\text{grad}}/A - \\ q_{\text{cond}}/A \} / (t_w - t_{\infty}) \dots \dots \dots (2)$$

(2) 式で、 e はステンレス箔の巾、 s は厚さである。また、 q_{grad} は (3) 式より求められる。

$$q_{\text{grad}} = \epsilon \cdot \sigma \left\{ \left(\frac{T_w}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_{\infty}}{100} \right)^4 \right\} \dots \dots \dots (3)$$

しかし、 q_{grad} の値は微小であるので、数値計算を行うさいには省略した。また、 A はステンレス箔の伝熱面積で、0.00848 m^2 であった。また、 q_{cond} はビニール管内

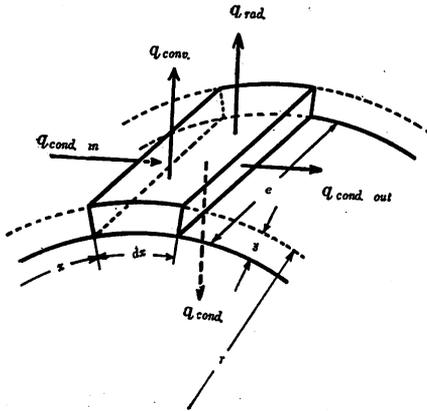


図 2

部への伝導熱量であるが、予備実験の結果、供給熱量の2%程度だった。なお、 $\frac{d^2t}{d\theta^2}$ は実験により温度分布を測定し、計算により求めた。

3・2 圧力分布と抗力係数の整理

圧力係数 C_p を(4)式で定義し、圧力分布を表示する。抗力係数 C_D は、圧力分布にもとづき(5)式で整理した。

$$C_p = (P - P_0) / \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot u^2_{\infty} \dots\dots\dots (4)$$

$$C_D = \frac{\pi}{180} \int_0^{180} C_p \cdot \cos \theta \cdot d\theta \dots\dots\dots (5)$$

3・3 実験結果

Num

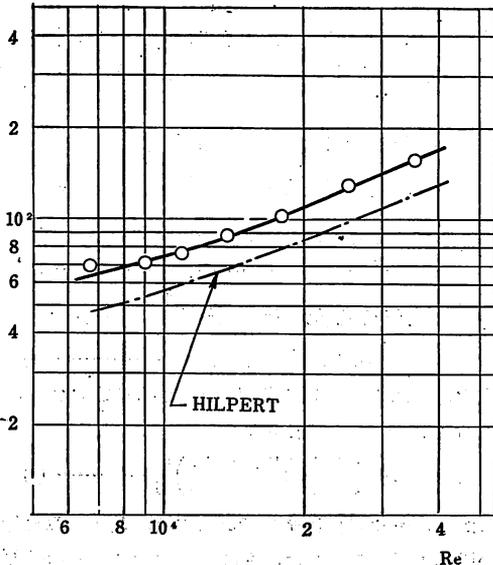


図 3

干渉円柱をおかない単円柱の平均熱伝達率の測定結果を図3に示す。図には HILPERT²⁾の実験結果をも併せ示したが、それよりはやや高い熱伝達率となっている。なお、図4に局所値の測定結果例を示す。

次に干渉円柱を供試円柱の後方においた場合について述べる。

$Re = 2.5 \times 10^4$ を一定にして、2円柱間の距離 L を種

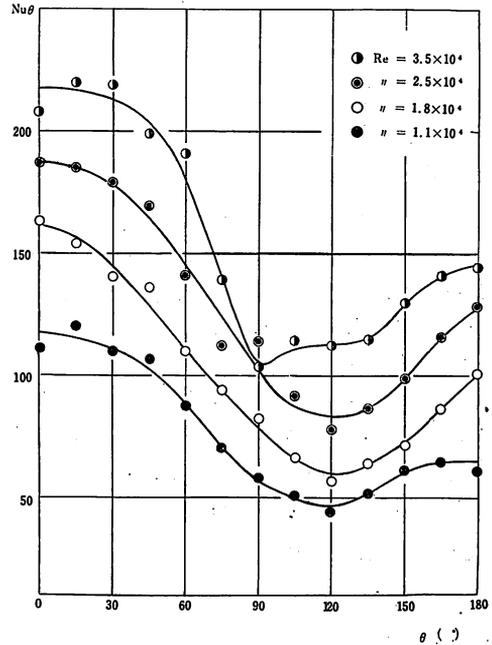


図 4

々変化させた場合の平均ヌセルト数 Num と抗力係数 C_D の変化を図5に示した。

図から明らかなように、干渉円柱がある場合の抗力係数 C_D の値は、2円柱間の距離 L の大小にかかわらず、ほぼ、単円柱、すなわち、 $L/d = \infty$ の C_D 値より大となっているが、 L/d によりかなり変化する。すなわち、 $L/d = 1.0$ 附近を境にして、 C_D の値は特に変化し、 $L/d > 1.0$ では小さな変化があるものの単円柱の C_D にかなり近い値になり、 $L/d < 1.0$ では、 $L/d = 1.0 \sim L/d = 0.4$ 附近まで L を小にしてゆくと、 C_D は急増し、 $L/d = 0.4$ の C_D は単円柱のそれより約19%大きな値となっている。またこの範囲で $L/d = 0.2$ 附近に極小値が存在するが、単円柱の C_D よりは大い。

なお、図6に圧力分布を示す圧力係数 C_p の L/d による変化例を示した。図で抗力係数 C_D が単円柱、すなわち、 $L/d = \infty$ の場合とほぼ同じ値を示した $L/d = 1.5$ の

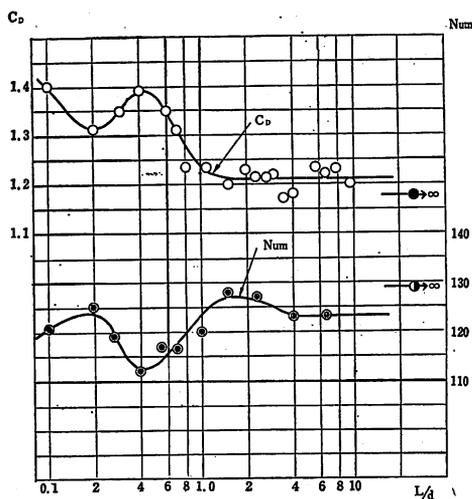


図 5

数 Num は単円柱の場合と比較して総じて低い値となっているが、抗力係数 C_D と同様、 L/d によりかなり変化している。すなわち、 $L/d > 1.5$ 場合は、ほぼ単円柱のそれに近い値になっているが、 L/d が 1.5 より小さくなるに従って、Num も小となってゆき、 $L/d = 0.4$ 附近が極小となり、単円柱の場合より約 12% 低い Num となっている。 L/d を更に小にすると、再び Num が増加し、 $L/d = 0.2$ 附近で極大となるが、単円柱のそれに比較すると小さな値となっている。

以上のことから、 C_D と Num の間には、一方が増加すれば他方が減少、他方が増加すれば一方が減少というような関係があることがわかる。すなわち、 L/d をほぼ 1.5 より小にしてゆくと、抗力係数は増大してゆくが、熱伝達率は減少してゆき、 $L/d = 0.4$ 附近で C_D は極大、Num は極小となる。さらに、 L/d を小にしてゆくと、 C_D は減少し、Num は増してゆき、 $L/d = 0.2$ 附近で C_D は極小、Num は極大となる。さらに L/d を小にすると、 C_D は再び増加し、Num は再び減少する。

次に局所ヌセルト数 Nu_θ の L/d による変化の例を

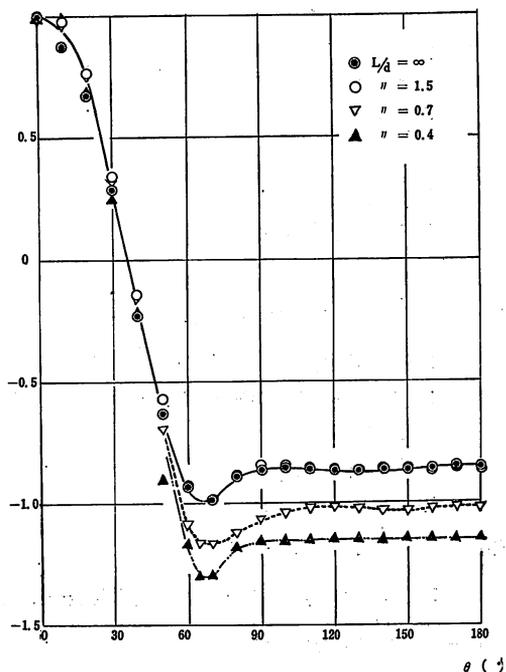


図 6

場合の圧力分布を示す曲線は、単円柱のそれとあまり変わらないが、 $L/d = 0.7$ 、 $L/d = 0.4$ の曲線は、ほぼ $\theta = 60^\circ$ 附近から後方において、 C_p が小となっていることがわかる。しかし、圧力分布曲線の形状そのものの大きな変化はみられない。また、図 5 において、平均ヌセルト

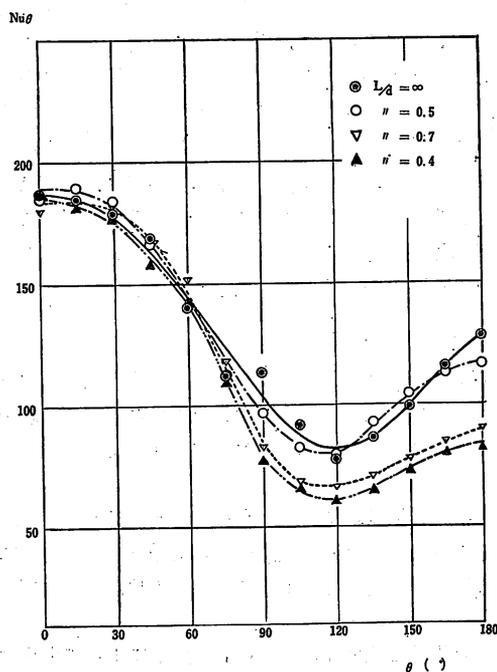


図 7

図 7 に示す。抗力係数が単円柱の場合とほぼ同じだった $L/d = 1.5$ の Nu_θ の変化は、やはり単円柱の Nu_θ の変化と大差ない。これに対して抗力係数の大となった $L/d = 0.7$ 、 $L/d = 0.4$ の Nu_θ の変化は、約 $\theta = 0^\circ \sim 75^\circ$ までは単円柱の場合のそれと大きな差はないが、 $\theta = 80^\circ$

以降において干渉円柱の影響があらわれている。圧力分布への、干渉円柱の影響が $\theta = 60^\circ$ 以降にあらわれていることを考えると約 20° のずれがあることがわかる。

$Nu_{\theta=180}$

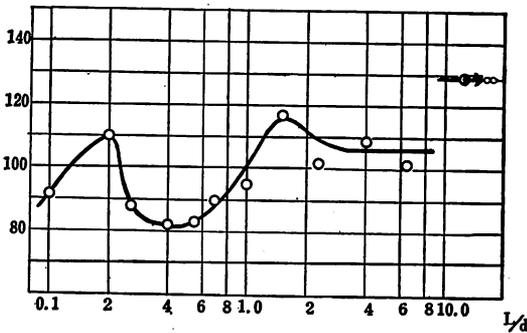


図 8

なお、 L/d による影響を、もっとも受けると考えられる $\theta = 180^\circ$ の局所ヌセルト数の変化を図8に示すが、 Num の L/d による変化と、ほぼ同様の傾向があると云える。

以上、干渉円柱による、供試円柱の熱伝達への影響を述べたが、 L によっては、供試円柱後方($\theta = 80^\circ$ 以降)の熱伝達がかなり悪くなることがわかった。このことは供試円柱と干渉円柱間に死水領域が形成され、主流との間の熱移動がある程度妨げられることによると考えられる。しかし、この領域の内部においては、非定常的な流れが複雑に入りこんでいて、2円柱間の距離によっては熱伝達がよくなる場合もある。しかし、単円柱の場合よりは総じて熱伝達が悪くなっている。

4 結 言

強制対流下にある円柱表面からの熱伝達、及び圧力分布への、後方に同径の円柱をおいた場合の影響を測定し、 $Re = 2.5 \times 10^4$ の場合において、次のような結果を得た。

- (1) 抗力係数は、単円柱のそれより一般に大となり、しかも、2円柱間の距離によって変化し、とくに $L/d = 0.4$ 付近では単円柱の抗力係数より約19%高い値となった。
- (2) 平均熱伝達率は、2円柱間の距離によって変化するが、単円柱のそれより一般に小さく、とくに、 $L/d = 0.4$ 付近で極小となり、単円柱の平均熱伝達率より約12%低い値となった。
- (3) 抗力係数の変化と平均熱伝達率の変化は、互に逆になっていて、 L/d の変化により一方が増加すれば他方が減少、他方が増加すれば一方が減少となるような関係があることがわかった。

- (4) 局所値の場合は、圧力分布で、ほぼ $\theta = 60^\circ$ 以降、局所熱伝達率で、ほぼ $\theta = 80^\circ$ 以降に、とくに干渉円柱の影響があらわれる。

最後に本実験装置の製作に協力戴いた本校保坂新英氏に感謝の意をあらわします。

5 記号説明

i : ステンレス箱を流れる電流 (アンペア)

R : " の単位長さの抵抗 (オーム)

λ_p : ビニール管の熱伝導率 ($\text{kcal}/\text{mh}^\circ\text{C}$)

s : ステンレス箱の厚さ (m)

e : " の巾 (m)

t : 温度 ($^\circ\text{C}$)

α_θ : 局所熱伝達率 ($\text{kcal}/\text{m}^2\text{h}^\circ\text{C}$)

q_{rad} : ステンレス箱からの放射熱量 (kcal/h)

A : ステンレス箱の面積 (m^2)

q_{cond} : ビニール管への熱伝導量 (kcal/h)

r : 円柱半径 (m)

θ : 供試円柱の前方よみ点からの角度 ($^\circ$)

ϵ : 放射率

σ : ステファンボルツマン常数 ($\text{kcal}/\text{m}^2\text{h}^\circ\text{k}^4$)

T_w : 表面温度 ($^\circ\text{k}$)

T_∞ : 主流温度 ($^\circ\text{k}$)

C_p : 圧力係数

P : 圧力 (kg/m^2)

P_o : " (")

ρ : 密度 ($\text{kg}\text{-sec}^2/\text{m}^4$)

u_∞ : 主流速度 (m/sec)

C_D : 抗力係数

$$Num = \frac{\alpha_m \cdot d}{\lambda} : \text{平均ヌセルト数}$$

α_m : 平均熱伝達率 ($\text{kcal}/\text{m}^2\text{h}^\circ\text{C}$)

λ : $(t_\infty + t_w)/2$ の空気の熱伝導率 ($\text{kcal}/\text{mh}^\circ\text{C}$)

d : 円柱直径 (m)

L : 円柱間の距離 (m)

$$Re = \frac{u_\infty \cdot d}{\nu} : \text{レイノルズ数}$$

ν : $(t_\infty + t_w)/2$ の空気の動粘性係数 (m^2/sec)

$$Nu_\theta = \frac{\alpha_\theta \cdot d}{\lambda} : \text{局所ヌセルト数}$$

添 字

∞ : 主 流

w : 表 面

参 考 文 献

- 1) W·H·GIEDT, BERKELEY, CALIF, Trans. ASME, Vol 71-4 (1949), 375
- 2) HILPERT: Forsch, Gebiete Ingenieurw., 4 (1933), 215