



Title	層流境界層内に二次元的な細いワイヤーを設置した場合の熱伝達の実験
Author(s)	千谷, 茂; 親川, 兼勇
Citation	琉球大学理工学部紀要. 工学篇 = Bulletin of Science & Engineering Division, University of the Ryukyus. Engineering(10): 1-6
Issue Date	1975-09-01
URL	http://hdl.handle.net/20.500.12000/26598
Rights	



層流境界層内に二次元的な細いワイヤーを設置した場合の熱伝達の実験

千谷 茂* 親川兼勇*

The Effects of Two Dimensional Thin Wire Placed within Laminar Boundary Layer on Heat Transfer in a Flat Plate.

Shigeru CHIYA and Kenyu OYAKAWA

This investigation was carried out to clarify the effects of two dimensional thin wire, placed within laminar boundary layer on the local heat transfer rate using two dimensional wind tunnel. The temperature difference between main flow and the plate was made by heated plate under the condition of a constant heat flux, and from its results the local heat transfer coefficient in a flat plate was calculated. especially the thin wire was attached a flat plate, we measured the intensity of turbulence by the hot wire anemometer in the boundary layer and main flow.

Comparing the results heat transfer and turbulence, we found that the intensity of turbulence and its region were larger, the local heat transfer rate in its region was augmented, and laminar flow was transformed into the turbulent flow just to behind the wire. and placed in the same condition of gradient of velocity, the wire diameter was larger, the local heat transfer rate was more increased in the region behind the thin wire. However the wire diameter was in certain size, the velocity gradient was not influence on heat transfer.

1. 序 論

層流境界層内におかれた粗さの遷移におよぼす影響に関する問題は、遷移を誘発しないような許容限界高さを推定するという実的重要性にかんがみ、1930年代 Shiller に始まり、我が国においては谷⁽¹⁾らによって研究がなされている。一方伝熱工学の分野においては熱伝達率を増大せしめる手段として、逆に伝達面⁽²⁾を粗くすることが積極的に利用され、その基礎的

研究も数多く報告されているが、その大部分は乱流境界層を取り扱ったものである。伝達面を粗くしたり、または境界層内の速度勾配の異なる位置に細いワイヤーを設置したりするのは、壁面近傍における流れに何らかの影響を与えることにより、境界層を乱し、それによって熱伝達率の促進を期待しようということである。熱伝達を促進せしめるということは、その伝熱機構がいかなるものであるかを知らなければならない。今流体に空気を用いるならば、高温部より低温部に熱が移動されるということは、流体が静止しているか、対流現象を伴っているかに無関係に空気の分子運動に

受付：1975年4月30日

*琉球大学理工学部機械工学科

よるのである。前者が伝導伝熱であり、後者が分子運動によって高温部より熱を授受した低温部の流体（内部エネルギー増加の形で）をいかに早く、効率よく下流におし流し得るかという熱伝達の問題である。このために流体の交換を早くするように、壁近傍に乱れを与え、その部分の流体を境界層外に早くおしやり、すぐに下流に移動させたい。したがって単に乱れが局部的に大きくても、その乱れによって境界層外縁近傍まで流体塊をおしやるのが出来ないとすれば、熱伝達率の促進は期待できず、また乱れの周期が非常に大きく、周りの流体がそこに入り込むことができないとすれば、やはり熱伝達の大なることは期待できない。著者の一人は平板層流境界層内に2次元の粗さを壁面に接着させ、粗さの直径を種々変化させ、粗さ高さにおいて得られる層流境界層内の速度、粗さ径よりなる粗さレイノルズ数、 Re_k がある値（ $Re_k = 300$ ）を境いにして、層流から乱流へ遷移する機構が異なり、局所熱伝達分布が対称的に異なることを示し、谷、Dryden等によって示されている流れの場よりの提案とだいたい一致することを示した。⁽³⁾本報告は平板層流境界層内に2次元の細いワイヤーを粗さとして設置した場合に、その粗さによって乱れを誘発し、層流より乱流に遷移する過程における伝熱機構を解明すべく、流速を一定にし、2次元の細いワイヤーを伝熱面に接着した場合、伝熱面より間隙を作り設置した場合について熱伝達の実験を行ない、それを乱れ分布との比較をすることで考察した。

2. 記号

- X : 流れ方向への距離 (mm)
 Y : 平板からの垂直上向き距離 (mm)
 U_∞ : 主流速度 (m/s)
 u : 局所速度 (m/s)
 u' : 乱れ成分 (m/s)
 $\sqrt{u'^2}$: Root-mean-square
 K : 二次元的な細いワイヤーの直径 (mm)
 C : ワイヤーと壁面との間隙 (mm)
 Re_x : 局所レイノルズ数 ($U_\infty \cdot X / \nu$)
 Nux : 局所ヌセルト数 ($hx \cdot X / \lambda$)

3. 実験装置および、実験方法

本実験に用いた装置の概略を Fig 1 に示す。吸込み

風洞で絞り比9、測定部断面は 300×300 mmで、その長さは1800mmである。測定用平板は前縁をシャープにし、主流に対してわずかに負の迎え角をもつようにし、風洞壁から50mm浮かして設置した。主流速度は9.7m/s一定で実験を行った。その際の主流乱れは0.4%、自然

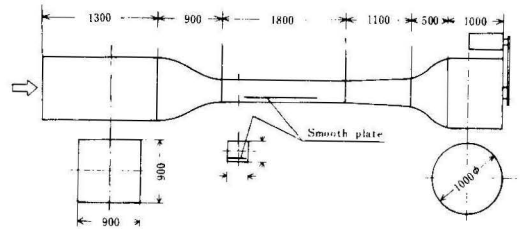


Fig 1. A experimental apparatus

遷移の臨界レイノルズ数 ($Ret)_0 = 2 \times 10^5$ で、その上流側での速度分布は平板上の各位置において、注射針偏平短形ピトー管で測定し、層流境界層の速度分布 (Blasiusの解)と良く一致することを確かめた。十分安定していると思われる $X = 100$ mm、150mmの位置に、2次元の細いワイヤーを伝熱面に接着した場合と、伝熱面との間隙を $C = 0.5, 0.85, 1.0, 1.2, 2.5$ mmに設置した場合について実験を行った。壁面に接着した場合には、壁面より0.2mmの位置における乱れの下流方向変化、粗さ下流でのY方向乱れ分布、また局所熱伝達分布を求めた。壁面と二次元的な細いワイヤーとに間隙がある場合には、局所熱伝達分布のみ求めた。なお二次元的な細いワイヤーとしては、ナイロンワイヤーと、銅線を用い、その径をそれぞれ0.65、1.2mm ϕ と1.0、2.0、2.3mm ϕ とした。測定加熱平板としては、厚さ15mm、幅300mm、長さ1000mmのベークライト板に厚さ30 μ のステンレス箔を接着し、直流電源を通じ熱流束一定の加熱面とした。伝熱面温度は板中心線上の62ヶ所にステンレス箔の裏面にハンダ付けされた70 μ のCu-Co熱電対によった。なお中心線上には縦みぞを設け、ガラスウールにより背面への熱損失の軽減に努めた。なおふく射による放熱量は1%以下なので無視した。各位置における熱起電力より、局所の壁面温度 T_w を求め、局所熱伝達率 hx は $hx = q / (T_w - T_\infty)$ より求めた。ここで T_∞ : 主流温度、なお流体としては空気を用いた。

4. 実験結果および、考察

4.1 速度分布 層流境界層内に置かれた細いワイヤー（二次元的粗さ）によって誘発される乱れの増加と、細いワイヤーの障害物があるために、平板壁面近傍の流れはせき止められ、粗さ頭上へと施回した後、壁面上に再付着する流れ場の変化により、層流は乱流へ遷移する。遷移する際に、乱れが大きければ大きい程、また施回流の程度が強ければ強い程、遷移への移行は早くなる。二次元的な細いワイヤーの径が小さければ小さい程、そのワイヤーの位置近傍でのみ流れは変化し、乱れも大となり、その下流でただちに乱れは減衰し、流れは元の層流へとなる。すなわち粗さによって誘発される乱れが、粗さ下流で流れの様子を変えることができない程の乱れである。このような場合は、熱伝達特性も自然遷移によるそれと同一である。粗さによって変化した流れの様子、乱れの増加が、粗さ近傍のみに限られ、粗さ下流で再付着した流れがまた元の層流となりその後遷移を始めるのを再付着遷移といい、粗さ後方で、層流となる領域が存在せず、粗さ直後ではなく離れた流れがすぐに遷移を開始するのをはく離遷移と呼ぶ。径が十分大きくなり、粗さレイノルズ数 $U_k \cdot K/\nu = Re_k > 300$ となると、粗さの位置よりすぐに遷移が行なわれる。そこで二次元的な細いワイヤーを平板先端からの距離 $X=150\text{mm}$ の位置に、壁面上に接着し、その径を $0.65, 1.2\text{mm}\phi$ 、2種の場合について、粗さ下流での各断面の速度分布を Fig 2 に示す。ここで層流

においては、 $K=0.65, 1.2\text{mm}\phi$ のいずれも壁近傍においては、まだはく離した状態で下流方向への速度は感知できない。粗さより 20mm 下流において各々再付着している。その後 $K=0.65\text{mm}$ の場合には $X=185$ の位置で層流となっている。(図中 $X=185\text{mm}$ で実線の曲線は層流境界層内の速度分布の理論解であり、実測値がその曲線と良く一致している)。 $K=1.2\text{mm}\phi$ の場合には層流領域が見られず、乱流への遷移過程の速度分布を示している。ここで $K=0.65, 1.2\text{mm}\phi$ の粗さレイノルズ数はそれぞれ $170, 550$ である。

4.2 乱れ分布 乱れの程度が大きいうことは、流体の質量交換が激しいことが予想され、それによって熱伝達が促進されると思われる。そこで壁面に二次元的な細いワイヤーを接着した場合に、そのワイヤーにより誘発される乱れが、下流にどのように影響をおよぼすかを、乱れが各断面において最大になるとと思われる $Y=0.2\text{mm}$ の位置に取り調べたのを Fig 3 に示す。

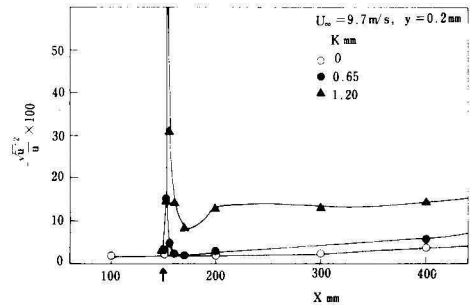


Fig 3. Local intensity of turbulence fluctuations near a plate ($y=0.2\text{mm}$)

図中横軸に矢印が付されているのが、粗さの位置を示す。粗さのない場には乱れは壁面との摩擦によるのみ増加し、下流方向へ単調に増加する。粗さ径 $K=0.65, 1.2\text{mm}\phi$ の場合には、粗さの直後で急に乱れは増加し、各々局所乱れが $15\%, 100\%$ 位となる、その後 $K=0.65$ の場合には減衰し、Smooth-plate の場合と大差のない分布を示す。一方 $K=1.2\text{mm}\phi$ では粗さの下流 20mm で極小値を示し、 $X > 200\text{mm}$ ではほぼ一定となる。 つぎに X の各断面における乱れ分布を Fig 4 に示す、縦軸に壁面からの距離 $Y\text{mm}$ 、横軸はそれぞれ局所乱れパーセントを取る。粗の上流 ($X=148\text{mm}$) においては、壁面の近傍でも、 $k=0.65, 1.2\text{mm}\phi$ のいずれも同程度の乱

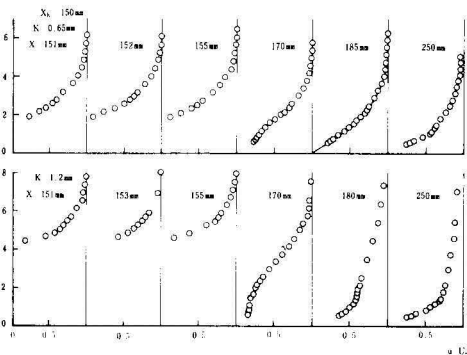


Fig 2. Distribution of mean Velocity for a different wire diameter

境界層の速度分布との比較の安さから縦軸に $Y/\sqrt{\frac{\nu X}{U_\infty}}$ 、横軸に u/U_∞ を取り示す。粗さより下流 1mm の位置に

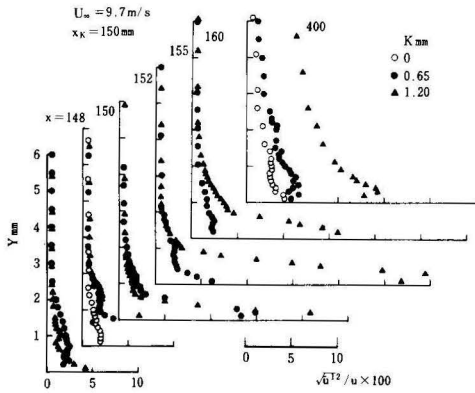


Fig 4. Local intensity of turbulence fluctuations for Y direction

れ分布をしており、境界層の外側では主流乱れと同じ0.4%である。粗さ位置においてもそれらに大差はない。粗さの下流2mmの位置では壁面近傍において、急に乱れが増大し、 $K=0.65$ 、 $1.2\text{mm}\phi$ でそれぞれ、15、20%にもなる。 $X=155\text{mm}$ の位置で $K=1.2\text{mm}\phi$ の場合、100%の局所乱れの程度を示し、 $K=0.65\text{mm}\phi$ では、 $X=152\text{mm}$ の位置での値より減少し6%になる。この断面でも $Y=2\text{mm}$ で主流乱れ0.4%に近づく。下流になるにつれて乱れ分布はふくらみをもち、 $X=400\text{mm}\phi$ になると $K=1.2\text{mm}\phi$ の場合 $Y>5\text{mm}$ でも6%の局所乱れを示す。上記の流れの場合より、 $K=0.65$ 、 $1.2\text{mm}\phi$ のいずれの場合も、粗さによって誘発される局所乱れの大きさは、粗さ直後において最大となり、それぞれ粗さの直後2mm、5mmで15、100%となるが、 $K=0.65\text{mm}\phi$ の場合には、乱れの増大するのは、壁のごく近傍に限られて、すぐに減衰し、再付着した後に、層流境界層を形成する。一方 $K=1.2\text{mm}\phi$ の場合には局所乱れが100%以上にもなり、壁近傍の局所乱れは減衰するが、全体的にみれば粗さによって誘発された乱れにより、さらに下流の乱れを誘発する形で増加する。

4.3 熱伝達特性 壁面に二次元的粗さを接着した場合の例を、 $K=0.65$ 、 $1.2\text{mm}\phi$ について縦軸に局所ヌセルト数 (Nux)、横軸に局所レイノルズ数 (Rex)を取り、Fig 5に示す。図中0印は粗さのない Smooth-plate の場合である。粗の上流においては、いずれも熱流束一定の層流熱伝達の式 $Nux=0.453 Rex^{1/2} \cdot Pr^{1/3}$

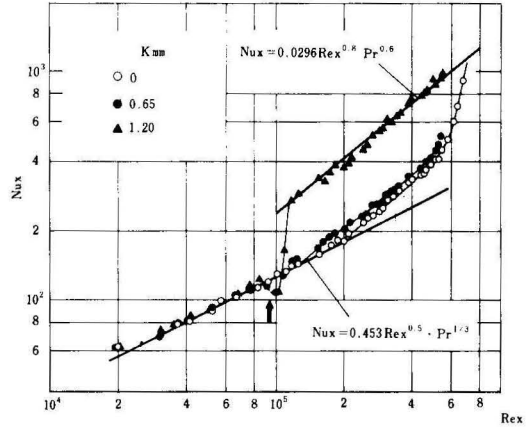


Fig 5. Effect of the diameter of a wire on the Local Nusselt Number ($C=0$)

に良く一致している。 $K=0.65$ 、 $1.2\text{mm}\phi$ の場合にはFig 3、4より、 $X=152\text{mm}$ の位置で局所乱れが、それぞれ、15、20%を示したにもかかわらず局所ヌセルト数は層流解のそれより減少している。これは粗さの直後においては、それと同程度の渦が存在し、それによって乱れは大きくなる。しかしその渦は、壁面と、粗さの側壁に付着した状態で形成されており、流体の交換を伴うものではなく熱伝達も促進されないと推定できる。したがって $K=0.65\text{mm}\phi$ の場合には局所乱れが15%にもなるにもかかわらず熱伝達分布は Smooth-plate のそれと同様な自然遷移の形態を取る。一方 $K=1.2\text{mm}\phi$ の場合には、さらに全体的な乱れは増大するのですぐに遷移が始まり、 $X\geq 170\text{mm}$ で乱流へ移行し、乱流の熱伝達特性の近似解 $Nux=0.0296Rex^{0.8} \cdot Pr^{0.6}$ に一致する。つぎに壁面より離れた状態で二次元的な細いワイヤーを設置した場合について述べる。速度分布、乱れ分布等測定してないが、粗さが壁面上にある場合と関連付けて考察したい。まず層流の境界層厚さ $\delta=2\text{mm}$ になる $X=100\text{mm}$ の位置に、直径が 1.0mm 、 2.0mm 、 $3.2\text{mm}\phi$ の2種類の2次元な細いワイヤーを壁面より 1.0 、 2.5mm の位置に設置する。層流境界層内において、粗さによって誘発される乱れが、その位置における速度勾配によるものとすれば、壁面と粗さとの間隙 C を一定し、その径を変化させても壁面近傍での乱れは変わらないはずである。しかし K とともに乱れる領域は大きくなる。これらの様子を Fig 6 に示す。図よりワイヤーの直後

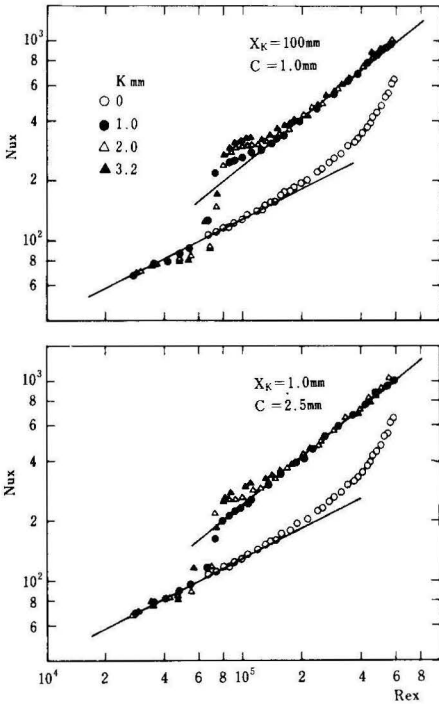


Fig. 6 Effect of the diameter of elements on the local Nusselt Number for $X_K=150\text{mm}$

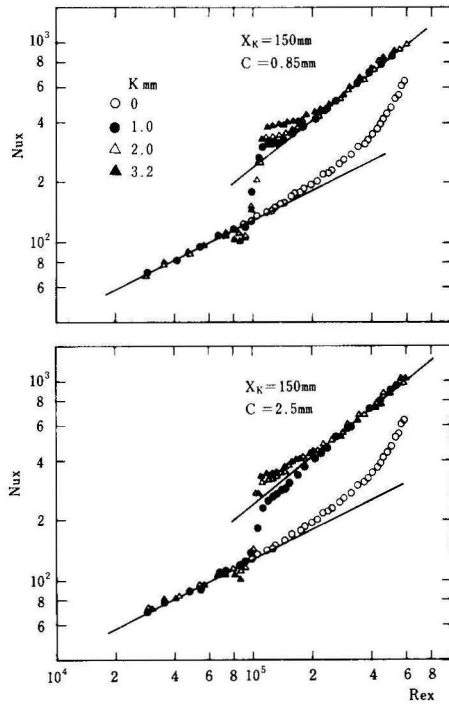


Fig. 7 Effect of the diameter of a wire on the local Nusselt Number for $K=1.0\text{mm}$

ですぐに乱流に遷移を始め、下流20mm位で、その位置における乱流熱伝達の近似解よりオーバーシュートする。その割合はKとともに大きくなる。また下流におよぶ領域もKとともに大となる。また境界層の外縁近傍におかれた場合 (間隙 $C=2.5\text{mm}$)、 $K=2.0, 3.5\text{mm}$ ではオーバーシュートが見られ、その領域も間隙が 1mm の場合より下流までおよぶ。 $K=1.0\text{mm}$ の場合にはオーバーシュートもみられず、他より下流で乱流へと移行する。また境界層厚さが 2.5mm となる位置 ($X=150\text{mm}$) に同様なことを行い Fig 7 に示す。とくに間隙が 0.85mm においてオーバーシュートした部分の局所熱伝達分布は、それぞれ一定値を保つた後、乱流特性へ移行している。また間隙が 2.5mm の場合の $K=1.0\text{mm}$ は粗さ位置より遷移が始まり、漸次乱流特性へ移行する。つぎに $X=100, 150\text{mm}$ の位置に二次元的な細いワイヤの径として、間隙を $C=0.5, 0.85, 1.0, 2.5$ と変化した場合の局所熱伝達分布の様子を Fig 8 に示す。 $X=100\text{mm}$ の場合には間隙が小さい程、オーバーシュートの割合は大きい。しかし $X=150\text{mm}$ では間隙が $0.5,$

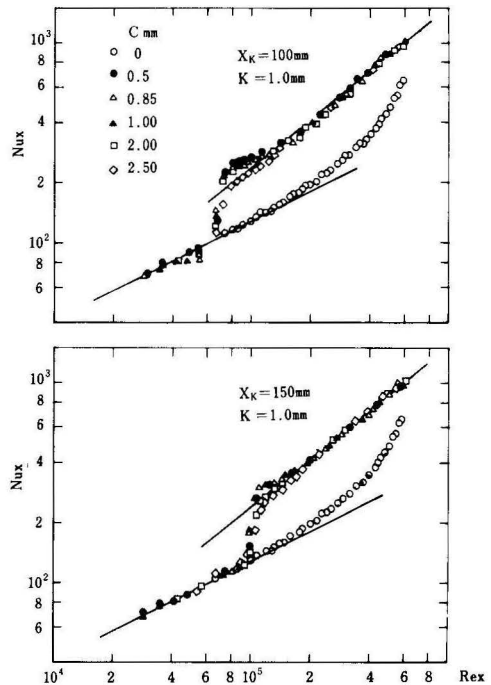


Fig. 8 Effect of the Clearance between a plate and a wire on the local Nusselt Number for $K=1.0\text{mm}$

0.85、1.0mmについては大差ない。このことは $X=100$ mmの位置と比較して境界層厚さも大となり、同一間隙でも、二次元的なワイヤーと壁面を通過しようとする流速は小さく、再附着する流れに誘因される形で間隙を通過する流れも壁面に沿って下流方向へは流れずに乱れを誘発する形で存在し、間隙が小さい場合には余り差がみられないものと推定される。つぎに Fig 9に

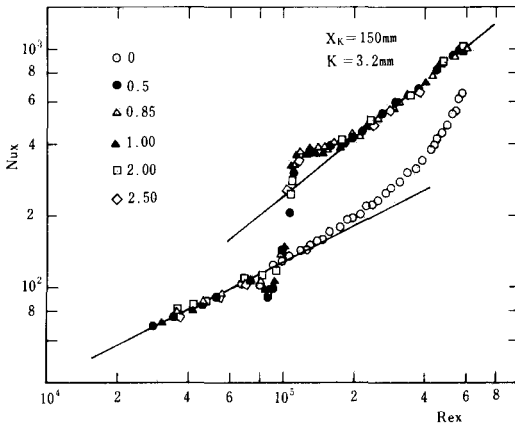


Fig 9. Effect of the Clearance between a plate and a wire on the local Nusselt Number for large diameter of element

示すように、ワイヤー径が大きくなると($K=3.2\text{mm}\phi$)、間隙の影響よりむしろ径による影響が大きい。すなわち速度勾配の異なれば誘発される乱れは異なるはずであるが、径が大きければ、それに関係なくなる。またワイヤーの直後において他に比べて低い値を示すのは、ワイヤーが壁面に接着した場合の挙動によるものと同様に説明できる。

4. 結論

以上の実験結果より、層流境界層内において、二次元的な細いワイヤーを壁面に接着した場合と、壁面より離して設置した場合に対してつぎのことが言える。

- 1) 乱れが局所的に大きくなっても、壁面近傍に限られ、領域が大きくなる場合には熱伝達率の促進はない。
- 2) 速度勾配の異なる位置には、その径の大きさとともに変化するが、ある程度の大きさとなると、速度勾配の影響はなくなる。
- 3) 間隙を一定にした場合、径とともにオーバーシュートの割合は大となる。

最後に、本実験を進めるに当り、御指導、御協力を賜りました岐阜大学工学部馬淵幾夫教授、熊田雅弥助教授、当機械工学科学生古波蔵喜弘君、比嘉憲光君に厚く謝意を表します。

5. 参考文献

- 1) 谷一郎：東京大学航空研究集報 第1巻第5号
：Journal of Physical Society of
JAPAN vol. 11.No.12 (1956-12)
- 2) N. V Zozulya; Heat Transfer. Soviet
Research vol.2 No.1 (1970-1)
- 3) 馬淵、親川：日本機械学会講演文集
No.730-17 (1973-10) P 21