

報告番号 \* 甲 第 2269 号

## 主論文の要旨

題名 粗面をもつ矩形流路内乱流の流動

および熱伝達に関する研究

氏名 廣田真史

# 主論文の要旨

報告番号	※甲第	号	氏名	廣田真史
<p>非円形断面をもつ流路内の流れが乱流の場合には、乱流応力場の非等方性に起因して、第2種の二次流れが発生する。この第2種二次流れは、速度は主流速度の高々1%程度と小さいにもかかわらず、流路内の流れを完全に3次元化する。そのため、全壁とも平滑な面で構成される最も基本的な矩形流路内の流動でさえ、円形流路に比べて非常に複雑な特性を示す。また、この第2種二次流れは流路内の温度場、ひいてはその伝熱特性にも影響を及ぼす。</p> <p>非円形流路は工業装置においてもよく見られるが、とくに熱輸送を目的とする流路では、伝熱促進のために流路内壁を粗面にすることがある。流路内壁の表面性状は内部の乱流応力場に大きな影響を及ぼすため、このような粗面流路内の第2種二次流れのパターンは、滑面流路におけるパターンとは著しく異なると予想される。また流路内の温度場も二次流れの影響を受けるため、粗面流路における伝熱特性を予測することは、滑面流路の場合よりも一層困難となろう。このように、粗面をもつ矩形流路内乱流の流動特性を明らかにすることは、流体力学的のみならず伝熱学的見地からも重要である。しかし、従来この種の問題を取り扱った研究例は極めて少ない。</p> <p>本研究の目的は、粗面をもつ矩形流路内の乱流熱伝達特性を把握する上で不可欠である流路内の速度場および乱流応力場を、第2種二次流れの挙動を中心に実験的に明らかにすることである。流路系としては、1面に粗面をもつ正方形流路（流路断面 50mm x 50mm, 全長 4500mm）、および縦横比が2の長方形流路（流路断面 100mm x 50mm, 全長 5000mm）の長辺壁あるいは短辺壁のうち1面を同じく粗面にした直線流路を選び、流路内部の完全に発達した空気流を実験対象とした。粗面壁には、1mm x 1mm の正方形断面をもつ角柱状の粗さ要素を、各流路の全長にわたって、主流軸に対し垂直に 10mm 間隔で貼り付けたリブ状粗面を用いた。測定は、断面内平均速度と流路の水力直径により求めたレイノルズ数が <math>6.5 \times 10^4</math> の条件において、主に熱線流速計により行った。以下に、本研究で明らかになった諸点を要約する。</p> <p>1章では、矩形流路内の乱流および強制対流熱伝達に関する過去の研究について概説し、本研究の目的および意義について述べるとともにその位置づけを行った。</p> <p>2章では、実験に先だって、X形熱線プローブによる二次流れ速度および乱流せん断応力の測定法について検討した。まずX形熱線プローブによりこれらの量を測定する際に生じる誤差について解析し、互いに鏡像の関係にある2種</p>				

## 主論文の要旨

報告番号	※甲第	号	氏名	廣田真史
<p>類のプロープを用いて、測定誤差の大部分を占める速度こう配に起因する誤差を消去する方法を提案した。そして、この方法が従来の方法に比べて信頼性の非常に高い測定値を与えることを実験的に証明した。</p> <p>3章～5章では、1面に粗面をもつ正方形および長方形流路内の乱流に関して得られた基本的な測定結果を提示し、各流路の流動特性を明らかにするとともに、各速度場あるいは各応力場の間の類似点および相違点について検討した。</p> <p>まず3章では、幾何学的に最も基本的な矩形粗面流路である、1面にリブ状の粗面を設けた正方形断面流路内の発達した乱流について、平均速度および乱流応力場を測定し、流動特性を明らかにした。さらに、リブ状粗面に特有な測定断面と粗さ要素との相対位置の違いが、乱流諸量の分布に及ぼす影響について検討した。主な結果は、以下のように要約できる。</p> <ol style="list-style-type: none"><li>(1) 粗面流路の主流平均速度<math>U_1</math>の等値線は、粗面上では壁面に平行であるが、粗面に対向する滑面上では流路中心に向かって大きくくぼみ、粗面に隣接する滑面上ではこれとは逆に壁面に向かってふくらむ。</li><li>(2) 本実験の1面粗面流路では、二次流れの様相は滑面流路の場合と著しく異なり、流路断面内に大きな縦渦が二つだけ存在する。すなわち、その流れは流路対称軸を粗面に向かって下降し、粗面に隣接する滑面に沿って上昇する。</li><li>(3) 変動速度は、粗面壁近傍において粗面に対向する滑面側の2倍程度大きい値を示す。断面全体にわたってみれば、主流方向の変動速度成分<math>\sqrt{u_1^2}</math>が最も大きく、粗面壁に平行な速度成分<math>\sqrt{u_2^2}</math>、垂直な成分<math>\sqrt{u_3^2}</math>の順に小さい。</li><li>(4) 乱流せん断応力のうち粗面に平行な成分<math>\overline{u_1 u_2}</math>は、定性的に滑面流路の分布と似ているが、粗面に垂直な成分<math>\overline{u_1 u_3}</math>は、粗面に近い領域の値が3倍程度に大きくなり、分布形状も異なる。また、こう配輸送モデルは、流路内の乱流せん断応力分布を推定するのに有効である。</li><li>(5) 二次流れおよび乱流せん断応力の分布には、測定断面と粗さ要素との相対位置の違いによる差異が現れる。しかし、その差異は粗面壁の極近傍にとどまっており、断面全体にわたる分布には顕著な差異は現れない。</li></ol> <p>ついで4章では、断面の縦横比が2の長方形流路の、長辺壁のうち1面を粗面とした流路内の十分に発達した乱流に関して、以下のような結論を得た。</p> <ol style="list-style-type: none"><li>(1) 主流平均速度<math>U_1</math>の等値線は、粗面に対向する滑面壁近傍で流路中心に向かって大きくくぼみ、短辺壁および粗面壁近傍では、壁面に向かってふくらむ。こうした等値線分布の傾向は、正方形粗面流路における<math>U_1</math>分布とよく似ている。</li></ol>				

## 主論文の要旨

報告番号	※甲第	号	氏名	廣田真史
<p>(2) 粗面流路内の二次流れのパターンは滑面流路のそれと著しく異なり、各短辺壁近傍には、正方形粗面流路と同様に、大きな縦渦が一つずつ存在する。一方、流路中央部には対向滑面壁から粗面壁に向かう下降流が現れる。</p> <p>(3) 粗面壁近傍の変動速度は滑面流路の2倍程度大きい。また、粗面に隣接する滑面短辺壁近傍にも比較的大きな値を示す領域が存在する。</p> <p>(4) 乱流せん断応力分布は、滑面・粗面両流路ともに<math>U_1</math>の分布と明らかな対応を示し、正方形流路の場合と同様、こう配輸送モデルの妥当性を支持する。</p> <p>5章では、短辺壁のうち1面を粗面とした長方形流路内の十分に発達した乱流について、長辺壁を粗面とした場合と同様に詳細な測定を行い、流動特性を明らかにするとともに、前章までに示した他の粗面流路内の乱流との類似点・相違点について検討した。主な結果は以下の通りである。</p> <p>(1) 主流平均速度<math>U_1</math>の等値線は、各短辺壁近傍で滑面流路とよく似た分布を示す。しかし、流路中心部では、等値線は対向滑面壁側に向かって開き気味になる。</p> <p>(2) 粗面壁側の二次流れ分布は、長辺壁を粗面とした流路の短辺壁近傍によく似ており、一つの大きな縦渦を形成する。他方、対向滑面壁側の隅部には、滑面流路の場合と同様の隅に向かう流れが現れる。</p> <p>(3) 粗面流路の乱流せん断応力のうち、粗面壁に垂直な成分<math>\overline{u_1 u_2}</math>の分布は滑面流路とは著しく異なり、粗面壁近傍の値は滑面流路の3倍に達する。一方、粗面壁に平行な成分<math>\overline{u_1 u_3}</math>の分布は、定性的かつ定量的に、滑面流路の分布に一致する。また、異符号の閉領域の存在は<math>U_1</math>の分布と対応して説明され、先の二つの粗面流路の場合と同様に、こう配輸送モデルの有効性を示唆する。</p> <p>(4) 粗面流路における乱れエネルギー <math>k</math>の生成に対しては、乱流せん断応力による寄与が卓越しており、<math>k</math>の分布を支配する。</p> <p>6章では、前章までに示した測定結果に基づき、滑面および粗面流路内の渦度の収支を明らかにし、粗面流路における二次流れの生成機構について検討した。さらに、正方形粗面流路内の乱れエネルギー生成項と対流項の分布に注目し、流路内の乱れエネルギー収支に及ぼす粗面壁の影響を明らかにした。結果は以下のように要約できる。</p> <p>(1) 正方形滑面流路および長方形滑面流路では、渦度輸送方程式の乱流垂直応力による渦度生成項 <math>\partial^2(\overline{u_2^2 - u_3^2}) / \partial x_2 \partial x_3</math> と渦度対流項 <math>(U_2 \cdot \partial \Omega_1 / \partial x_2 + U_3 \cdot \partial \Omega_1 / \partial x_3)</math> の分布の間に定量的にも良好な対応が認められ、Brundrett -</p>				

# 主論文の要旨

報告番号	※甲第	号	氏名	廣田真史
<p>Bainesにより提案された従来の二次流れ生成理論の妥当性を支持する。しかし、粗面流路では両者の対応はくずれ、とくに粗面壁側の隅部では乱流せん断応力による渦度生成項(<math>\partial^2/\partial x_3^2 - \partial^2/\partial x_2^2</math>)<math>\overline{u_2 u_3}</math>の寄与が無視できず、従来の生成理論は適用できない。</p> <p>(2) 正方形流路内における乱れエネルギーの生成は、滑面流路、粗面流路ともに、乱流せん断応力による寄与が最も大きい。しかし、粗面流路では、粗面壁近傍で乱流垂直応力による生成が乱流せん断応力のそれと同程度の寄与をもたらす、乱れエネルギーの生成に大きな影響を与える。</p> <p>(3) 乱流垂直応力による乱れエネルギーの生成項のうち、粗面流路においては、リブ状粗面に特有な主流方向へのこう配を含む生成項 <math>\overline{u_1^2} \cdot \partial u_1 / \partial x_1</math>の寄与が最も大きい。また、粗面壁近傍では、粗面壁に垂直な応力成分による生成項 <math>\overline{u_3^2} \cdot \partial u_3 / \partial x_3</math>の寄与も大きくなる。</p> <p>(4) 乱れエネルギーの二次流れによる対流項は、滑面流路、粗面流路ともに、生成項に比べて極めて小さく、流路内の乱れエネルギー分布にはほとんど影響を及ぼさない。</p> <p>7章では、粗面流路内の強制対流熱伝達特性に及ぼす第2種二次流れの影響を明らかにする上で基礎となる、壁面を等温加熱面とした平滑な正方形流路内の空気流の温度場および伝熱特性を測定し、次のような結果を得た。</p> <p>(1) 本滑面流路の伝熱特性は、平均ヌセルト数 <math>Nu</math>がレイノルズ数 <math>Re</math>に対して指数関数的に増加し、実験式 <math>Nu = 0.0221 \times Re^{0.8}</math> で表すことができる。</p> <p>(2) 局所壁面熱流束 <math>q_w</math>は流路対称軸近傍で極小値、対称軸と隣接壁面との中間付近で極大値をとった後、流路隅部に向かうにつれて減少する。</p> <p>(3) 平均温度の等値線は、二次流れの影響により流路隅部の二等分線に沿って突出し、流路対称軸上では流路中心に向かってくぼむ。温度変動強度分布も同様の特性を示すが、突出・くぼみともに平均温度分布よりも顕著である。</p> <p>(4) 流路対称軸に近い領域では、<math>y^+ &lt; 200</math>において、平均温度に対する内層法則 <math>T^+ = 5.17 \log y^+ + 0.33</math> が成立する。しかし、隣接する壁面に近づくにつれて、平均温度分布は内層法則からの顕著な逸脱を示す。</p> <p>最後に8章では、2章～7章で得られた結論を総括的に検討し、本論文の結論とした。</p>				