

氏 名	柳 岡 英 樹
授 与 学 位	博 士 (工 学)
学 位 授 与 年 月 日	平 成 8 年 3 月 26 日
学 位 授 与 の 根 拠 法 規	学 位 規 則 第 4 条 第 1 項
研 究 科 , 専 攻 の 名 称	東 北 大 学 大 学 院 工 学 研 究 科 (博 士 課 程) 機 械 工 学 専 攻
学 位 論 文 題 目	剥 離 と 再 付 着 を 伴 う 鈍 頭 平 板 ま わ り の 流 れ お よ び 熱 伝 達 の 数 値 解 析
指 導 教 官	東 北 大 学 教 授 太 田 照 和
論 文 審 査 委 員	東 北 大 学 教 授 太 田 照 和 東 北 大 学 教 授 大 宮 司 久 明 東 北 大 学 教 授 相 原 利 雄

論 文 内 容 要 旨

第 1 章 諸 論

剥離と再付着を伴う流れは、航空機・船舶・自動車などの輸送機関、圧縮機やタービン等の流体機械など多くの状況下で発生する。この流れの剥離と再付着は、機器の性能や効率の低下を引き起こし、また振動や騒音の原因となるため望ましいものではない。他方伝熱工学的観点からは、剥離と再付着を伴う流れでは、せん断層の不安定化により巻き上がった渦が組織的渦構造へと成長し、熱・物質および運動量輸送を活発にするため、熱交換器や燃焼器などに積極的に利用されている。このように剥離と再付着を伴う流れの諸特性の解明は工学上極めて重要な課題であり、従来から数多くの研究が行われている。これまで研究されてきた基礎的流れとして、後向きステップや前向きステップまわりの流れ、突起やフェンス背後の流れ、スプリットプレートを有する垂直平板まわりの流れや鈍頭平板まわりの流れなどがあげられる。この中で本研究で扱う鈍頭平板まわりの流れは、剥離と再付着を伴う流れの中で最も簡単な形状の一つである。その特徴として、剥離点が固定されていて、片面に唯一の再循環領域を有し、平板前縁での境界層が剥離泡のスケールに比べて極端に薄く、剥離泡を規定する基本的なパラメータはレイノルズ数のみと考えると差し支えない。このことから、剥離・再付着流れの本質的な特徴を把握するのに最も簡単で理想的な形状であると言える。しかしながら、流れの構造は極めて複雑であり、従来から実験的研究が数多くなされているが、いまだに未解明な点が多い。また、数値解析による研究はごくわずかであり、鈍頭平板まわりの非定常乱流熱伝達機構を三次元解析により明らかにした研究はいまだにないようである。他方、近年のスーパーコンピュータの飛躍的な発達に伴い、複雑な乱流構造を直接計算により明らかにしようとする試みもなされている。

以上のような観点から、本研究では、剥離と再付着を伴う鈍頭平板まわりの複雑な流れ構造およびその熱伝達機構との関連を数値計算により明らかにしようとするものである。

第 2 章 鈍頭平板まわりの剥離と再付着を伴う流れおよび熱伝達の数値解析

第 2 章では、鈍頭平板まわりの流れとその熱伝達機構との関連をレイノルズ数 1000 の場合について二次元数値計算により明らかにした。せん断層の巻き上がりによって渦が生成され、合体、成長しながら大規模渦へと成長し、再付着領域よりほぼ周期的に放出されることを正確にとらえることができた(図1)。また、時間平均ヌセルト数の最大値は再付着点より上流に存在する。大規模渦構造の下部で瞬間ヌセルト数は極大値を示し、熱伝達が促進されることを明らかにした。

第3章 鈍頭平板まわりの剥離と再付着を伴う流れおよび熱伝達の三次元数値解析

第3章では、剥離と再付着を伴う鈍頭平板まわりの複雑な流れの三次元構造およびその熱伝達との関連を第2章と同じレイノルズ数1000の場合について三次元数値解析により明らかにした。二次元計算では乱れ量を過大評価するが、三次元計算を行うことにより改善でき、実験値との良い一致が得られることを示した。せん断層の不安定化により巻き上がった渦が三次元的な渦構造へと成長し、再付着領域からは周期的に放出される。また、比較的低いレイノルズ数にもかかわらず三次元性の強い流れとなり、再付着領域より放出される渦はヘアピン構造をしており、熱輸送機構に大きく寄与することを明らかにした(図2)。

第4章 鈍頭平板まわりの剥離と再付着を伴う高レイノルズ数流れと熱伝達の三次元数値解析

第4章では、鈍頭平板まわりの剥離と再付着を伴う高レイノルズ数流れと熱伝達をレイノルズ数5000の場合について三次元数値解析により明らかにした。第3章で行ったレイノルズ数1000の計算結果と同様にヘアピン形の大規模渦構造が存在し(図3)、流れ構造と熱伝達機構の本質にレイノルズ数による相違はほとんどみられないことを明らかにした。速度場に関しては、レイノルズ数5000の計算結果は、高レイノルズ数領域の実験値と良く一致すること(図4)、他方温度場はレイノルズ数への依存性が大きく、高レイノルズ数領域の実験値との相違がみられ、速度場とは異なる特徴を示すことが明らかにされた。

第5章 流路内鈍頭平板まわりの層流熱伝達に関する三次元数値解析

第5章では、剥離と再付着を伴う流路内鈍頭平板まわりの低レイノルズ数領域における定常層流および熱伝達に関し、二次元および三次元数値解析を行った。レイノルズ数の増加とともに剥離泡内で流れはらせん状に再循環し、スパン方向に対し放物線状に再付着する(図5)。このため壁面の温度分布に二次元性はほとんどみられない。側壁近傍に形成される馬蹄形渦は下流に向い成長し、また、レイノルズ数の増加とともに馬蹄形渦は大きく成長する。この馬蹄形渦により壁面近傍の熱が上方へ持ち去られ、熱輸送機構に大きく寄与している。流路中央と比較し側壁近傍のヌセルト数は馬蹄形渦の影響により著しく大きくなる。

第6章 流路内鈍頭平板まわりの非定常流れと熱伝達に関する三次元数値解析

第6章では、剥離と再付着を伴う流路内鈍頭平板まわりの非定常層流と熱伝達の三次元数値解析をレイノルズ数450の場合について行った。剥離・再付着領域における渦構造およびその時間変化を鮮明に観察ことができ、せん断層の不安定化に伴って再付着領域よりヘアピン構造の渦が周期的に放出されることを明らかとした(図6)。このヘアピン渦は壁面に対し傾斜し、壁面近傍の熱を持ち去り流れて行く。本研究の低レイノルズ数では、流路中央部には非定常流れが存在するが、側壁近傍の馬蹄形渦は定常的に存在していることが見出された。側壁近傍では流路中央部に比較してかなり高いヌセルト数を示し熱輸送が活発であることが明らかとなった(図7)。

第7章 結論

本研究の総括として各章で得られた結論をまとめている。

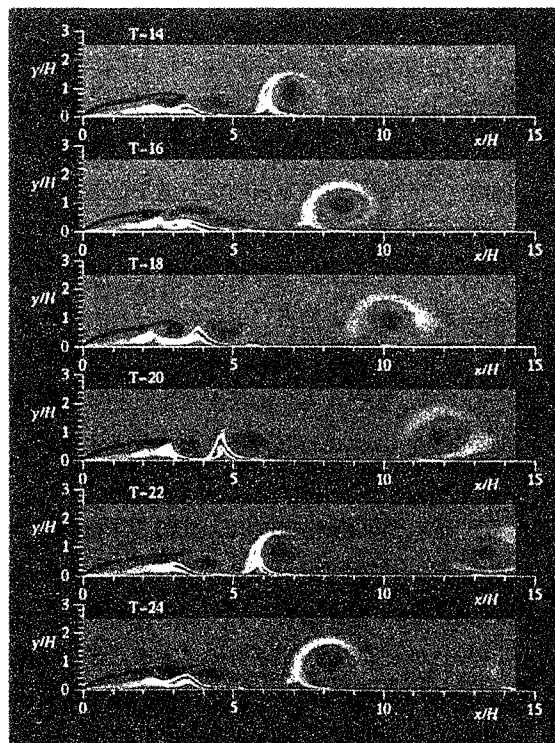


図1 スパン方向渦度の時間変化

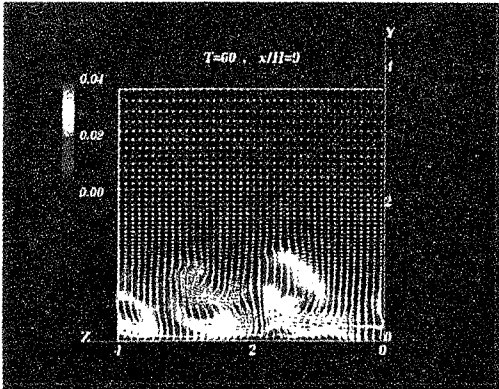
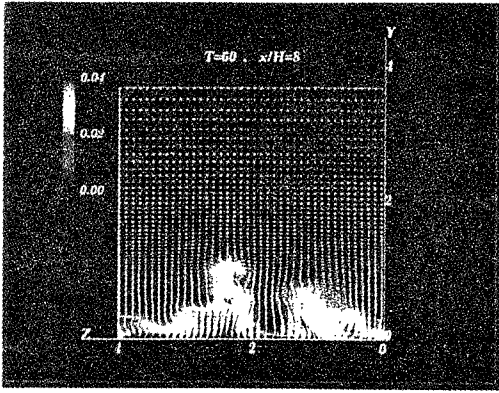


図2 速度ベクトルおよび温度分布

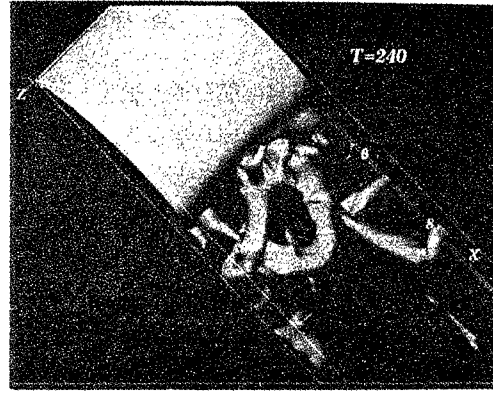


図3 圧力分布

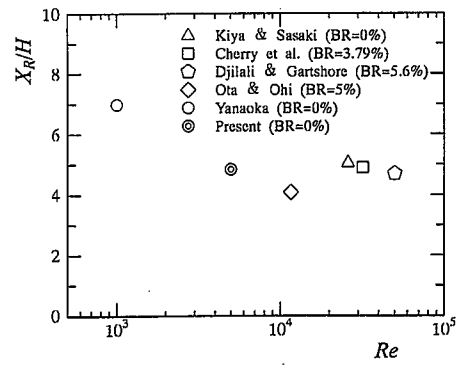


図4 再付着長さのレイノルズ数による変化

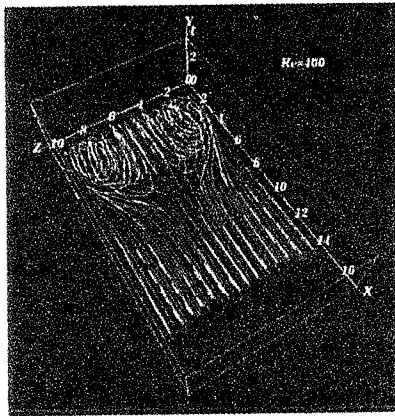


図5 流線

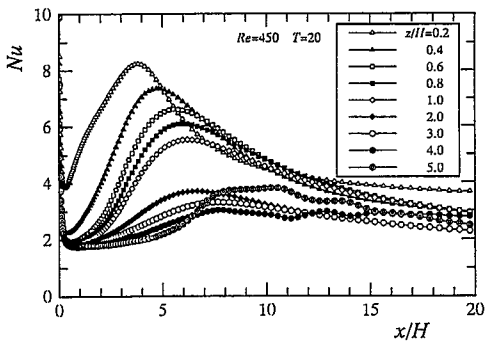


図7 ヌセルト数分布のスパン方向変化

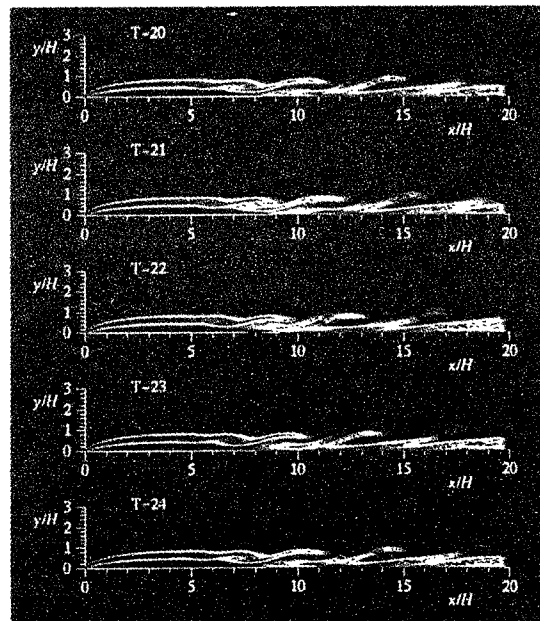


図6 スパン方向渦度の時間変化

審査結果の要旨

剥離と再付着を伴う流れは、航空機・船舶・高速陸上輸送機関、圧縮機やタービン等の流体機械などにおいて発生し、機器の性能低下や振動・騒音を引き起こす。他方、剥離したせん断層の不安定化や組織的渦構造への成長・放出が熱・物質および運動量輸送を促進することから、熱交換器や燃焼器では積極的に利用されている。剥離と再付着を伴う流れは逆流領域の発生や組織的渦塊への成長および放出による強い非定常性を有しきわめて複雑な流れであり、信頼度の高い測定は困難で、流れ構造と熱輸送機構との関連など十分解明されていない。

他方、近年の計算機の著しい発展とともに、剥離と再付着を伴う流れや熱伝達の数値解析による研究が数多くなされてきているが、実用的に有用な物体まわりの高レイノルズ数流れの直接シミュレーションはきわめて数少ない。

本研究は、鈍い前縁を有する有限な厚さの平板まわりの剥離と再付着を伴う流れを取り上げ、ナビエ・ストークスの運動方程式とエネルギー方程式を差分法により直接計算し、複雑な流れ構造とその熱伝達機構との関連を明らかにしようとしたもので、全編7章よりなる。

第1章は緒論である。

第2章では、鈍頭平板まわりの剥離と再付着を伴う流れおよび熱伝達機構との関連を、レイノルズ数1000の場合について、二次元数値計算により明らかにしている。剥離せん断層の不安定化、渦の生成・合体・成長による大規模渦の発生、その放出を正確に把握し、熱伝達特性との関連を示している。これらは有用な知見である。

第3章では、鈍頭平板まわりの複雑な三次元流れ構造と熱伝達との関連を、レイノルズ数1000の場合について、三次元計算により解明している。既存の実験値との良好な一致、剥離せん断層の三次元渦構造への成長、ヘアピン構造の渦放出と熱輸送との強い関連を明らかにしている。これらは重要な成果である。

第4章では、レイノルズ数5000の場合を取り上げ、三次元数値解析の結果を示している。基本的な三次元流れ構造はレイノルズ数1000の場合と本質的には変わらず、速度場の実験値とは良く一致するものの、温度場はレイノルズ数への依存性が著しいことを見いだしている。

第5章では、実験結果との厳密な比較を念頭において、矩形流路内に置かれた鈍頭平板まわりの低レイノルズ数における定常流れと熱伝達に関する二次元および三次元数値解析を行っている。レイノルズ数の増加とともに強い三次元流れが発生すること、側壁近傍に成長する馬蹄形渦とその熱輸送への大きな寄与を明らかにしている。

第6章では、矩形流路内鈍頭平板まわりの非定常流れと熱伝達の数値解析をレイノルズ数450の場合について行っている。剥離・再付着領域における渦構造とその時間変化、再付着領域からのヘアピン構造の渦放出、側壁近傍馬蹄形渦の定常的存在、これらの熱輸送機構との関連を示している。これらは有用な成果である。

第7章は結論である。

以上要するに本論文は、剥離と再付着を伴う鈍頭平板まわりの流れ構造とその熱輸送機構との関連を数値解析により明らかにしたもので、熱流体工学の発展に寄与するところが少なくない。

よって、本論文は博士（工学）の学位論文として合格と認める。