

	なか じま まどか
氏 名	中 島 円
授 与 学 位	博士 (工学)
学位授与年月日	平成 11 年 3 月 25 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) 機械知能工学専攻
学位論文題目	平面上突起物まわりの三次元剥離流れと熱伝達に関する数値解析
指 導 教 官	東北大学教授 太田 照和
論文審査委員	主査 東北大学教授 太田 照和 東北大学教授 圓山 重直 東北大学教授 中橋 和博 東北大学助教授 熊谷 哲

論文内容要旨

第 1 章 緒論

壁面上に固定された突起物は多くの流体機械や熱交換器を含む広範, 多岐にわたる工学分野に見られ, 従来より流れ場, 温度場に関する数多くの研究がなされている. 突起物まわりの流れは, 形状, レイノルズ数, 境界層厚さに対する突起高さの比によって大きく変化し, その根元には馬蹄形渦, 突起後方に循環領域が形成され, 突起側面および上面からの渦放出を伴い, 極めて三次元性の強い複雑な流れ場である. 馬蹄形渦は壁面の境界層遷移に大きな影響を及ぼし, また強い混合作用を有するため突起側面および固定壁面上の熱伝達に大きな影響を与える. そのような流れの詳細を解明するために多くの研究がなされてきたが, 流れは複雑であり, 馬蹄形渦や大規模剥離渦の放出に伴う非定常流れに関する詳細は十分に明らかにされていない.

一方, コンピュータに代表される電子機器においては, 小型高速化による単位面積当りの発熱量の増加が著しく, 冷却技術の向上が重要となり, IC パッケージ周囲の流れと熱伝達の機構を明らかにするため, 流路内に設置された突起物まわりの比較的低速の流れおよび熱伝達に関する実験および解析的研究が数多くなされている. 直方体突起物は IC パッケージの基本モデルの 1 つと考えられ, そのまわりの流れは強い三次元性を有する複雑な流れ場である. 低速場においては, 境界層厚さに対する突起高さの比が小さい物体まわりの流れの様相はレイノルズ数によって大きく変化し, 突起面熱伝達特性に大きな影響を与えるため流れの詳細を解明することは極めて重要である. しかしながら, 近年 LDV(Laser Doppler Velocimeter)や PIV(Particle Image Velocimetry)により二次元的な流れ場が計測されているが, 突起物まわりの渦放出や逆流を伴う三次元流れの測定は容易ではない. 他方, 近年の大型計算機の急速な発達により, そのような複雑な三次元流れおよび熱伝達に関する数値解析がなされるようになってきたが, 流れ場の詳細と熱伝達特性の関連についてはほとんど報告されていない.

以上のような観点から, 本研究では, 平面上に設置された直方体突起物まわりの流れと熱伝達の数値解析を, 特に上壁が存在する平行壁面流路内流れの場合について, 突起物まわりの三次元剥離流れの詳細を解明し, 流れ場と熱伝達特性の関連を明らかにしようとするものである. また, 平行壁面流路内に 2 列および 3 列の突起物が置かれた場合の流れと熱伝達に関する数値解析も行い, 突起配列に

よる流れ場および突起面熱伝達特性の変化の詳細を明らかにしようとするものである。

第 2 章 流路内突起物まわりの三次元剥離流れと熱伝達に関する数値解析

第 2 章では、平行壁面流路内に置かれた単一の直方体突起物まわりの三次元剥離流れと熱伝達に関する数値解析を行い、レイノルズ数による流れ場および温度場の変化の詳細を示し、流れ場と突起面熱伝達特性の関連を明らかにした。突起物まわりに形成される馬蹄形渦はレイノルズ数の増加と共にその個数が 2 個、4 個、6 個と変化し、渦度が強くなるため、突起前面、側面の熱伝達に大きな影響を与えることが示された。また、突起側面、背面近傍にも循環領域が形成されレイノルズ数と共に大きく変化するため、突起面の局所熱伝達率は極めて複雑な分布となることが明らかにされた。

第 3 章 渦放出を伴う流路内突起物まわりの三次元非定常剥離流れと熱伝達に関する数値解析

第 3 章では、第 2 章と同一条件でレイノルズ数が 1000 の場合に関して、特に流れの非定常性に着目し、馬蹄形渦と突起面からの渦放出に伴う非定常流れ特性およびそれらによる突起面熱伝達の非定常特性の詳細を明らかにした。レイノルズ数 1000 では、突起物まわりに形成される馬蹄形渦および突起上面前縁からの剥離せん断層は突起近傍で不安定となり、渦が放出され、突起上面、側面、背面近傍の流れと強く干渉し、突起面の熱伝達率が時間と共に大きく変化することが示された。また、馬蹄形渦と剥離せん断層の渦放出周波数は同一であり、それらは強い相関を持つことが明らかにされた。

第 4 章 流路内突起列まわりの三次元剥離流れと熱伝達に関する数値解析

第 4 章では、流れ方向に同一直方体突起物が 2 個設置された場合の三次元剥離流れと熱伝達の数値解析を行い、レイノルズ数および突起間隔による突起近傍の流れ場と突起面熱伝達の変化の詳細を明らかにした。突起間には全域におよぶ循環領域が形成され、その流れの様相は突起間隔およびレイノルズ数により大きく変化し、突起間隔が突起高さの 2 倍と 4 倍の場合にはスパン方向に非対称な流れ場が発生することが示された。また、上流突起の熱伝達特性は下流突起の影響をほとんど受けないこと、下流突起の熱伝達は流れ場の相違により上流突起の特性とは大きく異なることが明らかにされた。

第 5 章 広い突起間隔を有する突起列まわりの剥離流れと熱伝達に関する数値解析

第 5 章では、第 4 章と同様に流れ方向に同一直方体突起物が 2 個設置された場合で、特に突起の間隔が高さの 8 倍と比較的広い場合の三次元剥離流れと熱伝達の数値解析を行い、レイノルズ数による流れ場と温度場の変化および熱伝達特性の詳細を明らかにした。突起間隔が突起高さの 8 倍と広くなると、第 4 章に示したような突起間全域におよぶ循環領域は形成されず、上流突起まわりの流れは下流突起の影響を受けないこと、下流突起前面近傍の流れは上流突起前面近傍の流れとは極めて異なり、突起上流に馬蹄形渦は形成されず、下壁面から突起上面に向かう 2 つの循環流れが形成されることを明らかにした。また、下流突起の熱伝達特性は流れ場の変化の影響を受け局所的に複雑に変化し、平均ヌセルト数は上流突起と比較して約 25% 減少することが示された。

第 6 章 流路内千鳥状突起列まわりの三次元剥離流れと熱伝達に関する数値解析

第 6 章では、同一直方体突起物が千鳥状に 3 列配列された場合の三次元剥離流れと熱伝達の数値解析を行い、レイノルズ数による流れ場および熱伝達特性の変化、さらに 2 列目突起の影響を明らかに

している。1, 3 列目突起間の流れは 2 列目突起の存在により加速され、突起間全域におよぶ大きな循環領域は形成されず、1 列目突起後方に小さな循環領域が形成される。各突起前方の流れ場の様相はレイノルズ数と共に大きく変化し、3 列目突起前面近傍にはレイノルズ数が 500 になると馬蹄形渦が形成されるが、流れの様相は 1, 2 列目突起前面近傍の流れとは極めて異なることが明らかにされた。3 列目突起の突起面熱伝達は 2 列目突起による加熱の影響があるにも関わらず、1, 3 列目突起間全域におよぶ循環領域が形成されないことおよび加速効果により、2 列目突起が存在しない場合とほぼ同一であることが明らかにされた。

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。

審査結果の要旨

壁面上に固定された物体まわりの剥離を伴う流れは馬蹄形渦の形成、大規模渦の成長・放出を伴い、物体近傍には逆流領域が出現する非定常性の強いきわめて複雑な流れ場となる。このような剥離を伴う壁面上物体まわりの三次元流れ場の詳細に関する研究はごく少なく、熱伝達特性との関連については殆ど解明されていない。

本論文は、平行壁面流路内の平面壁面上に固定された直方体突起物まわりの三次元剥離流れと熱伝達特性の詳細を、数値解析により明らかにした研究結果を纏めたもので、全編7章からなる。

第1章は緒論である。

第2章では、平行壁面流路内に設置された単一直方体突起物まわりの三次元剥離流れと熱伝達に関する数値解析を行い、レイノルズ数による流れ場および温度場の変化の詳細を明らかにしている。突起物まわりに形成される馬蹄形渦はレイノルズ数の増加と共にその個数が、2, 4, 6と増加すること、それが突起面熱伝達特性に複雑に影響することなどを示している。これらは有用な知見である。

第3章では、第2章において見出された高レイノルズ数領域における流れの非定常性に着目し、レイノルズ数1000に関して、馬蹄形渦と突起面からの渦放出に伴う非定常流れ特性およびそれに伴う突起面の非定常熱伝達特性の詳細を明らかにしている。

第4章では、流れ方向に同一直方体突起物が2個設置された場合の三次元剥離流れと熱伝達の数値解析結果を示している。レイノルズ数および突起間隔の流れ場への影響は著しく大きく、また上流突起の熱伝達特性は下流突起の影響を殆ど受けないのに対して、下流突起の熱伝達特性は上流突起によって大きく変化することなどを明らかにしている。これは有用な成果である。

第5章では、第4章と同様に流れ方向に同一直方体突起物が2個、特に突起の間隔が高さの8倍に設置された場合について数値解析を行い、レイノルズ数による三次元剥離流れおよび熱伝達特性の変化を解明している。下流突起まわりに馬蹄形渦は形成されないこと、下流突起の平均ヌセルト数は上流突起より約25%減少することなどを示している。

第6章では、同一直方体突起物が千鳥状に3列配列された場合の三次元剥離流れと熱伝達の数値解析結果を示している。1, 3列目突起間の流れは2列目突起の影響を大きく受け、循環領域は縮小し、各突起前方の流れの様相はレイノルズ数によって著しく変化すること、また、3列目突起の熱伝達特性は2列目突起が存在しない場合と殆ど同一であることなどが明らかにされている。これらは工学上有用な知見である。

以上要するに本論文は、壁面上に設置された直方体突起物まわりの三次元剥離流れの詳細と熱伝達特性への影響を数値解析により明らかにしたもので、流体力学ならびに熱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。