

水平底面を有する等温物体まわりの自然対流 CFD 解析

長崎大学大学院生産科学研究科

津田 和則

有限サイズの加熱物体まわりの自然対流による伝熱は半導体や電子機器等の冷却において頻繁に発生する。このため電子機器等の熱設計を高精度に行うためには、加熱物体まわりの速度場および温度場を正確に推定する必要がある。加熱される物体は、通常、下向き水平面、垂直側面、上向き水平面のような複数の面で構成されるが、各伝熱面まわりの流体の流動様相が異なるため、それにとまって各面の温度場にも差異が生じ伝熱特性の相違が生じる。これまで、側面や上面が単独で加熱される場合には数多くの実験および理論研究から伝熱機構が明らかにされているが、加熱された下向き水平平板の場合には、自然対流による流動と伝熱の理論的予測は十分ではない。その主な理由は、有限幅の下向き水平加熱面からの自然対流の起動力は浮力ではなく、水平面下に沿う流体内の静圧勾配であるためである。Aihara らは、このことを速度場と温度場の詳細測定および写真観察から明らかにしている。さらに、Aihara らの下向き水平平板まわりの自然対流実験で得られている伝熱面近くの特異な流動様相（境界層の外側に形成される流れの反転）を十分に説明できる理論あるいは数値解析はこれまで公表されていない。最近、中野らは Aihara らの実験結果を説明する数値解を求めているが、中野らの研究では数値計算上の制約から計算領域の大きさに制限を設け、さらに流れの境界条件を Aihara らの実測された速度場を参考にして設定しているため、この種の問題を数値解析する一般化された手法にはなっていない。

本論文では、まず、Aihara らの実験を数値的に再現するため実験領域全体を計算領域とする CFD 数値解析を試み、水平下向き等温面の速度場と温度場の実験データとの比較検討から、Aihara らの実験結果の妥当性、すなわち現象自体が定常解として存在することの確認と本研究で使用する CFD コードの有効性を確認した。さらに、Aihara らの実験結果が、側面と底面を有する 2 次元現象であることによりその特有の現象である反転層形成の流れを生じることを示した。壁の無い自由空間であればその現象は生ぜず、熱伝達特性も異なることを示し、領域の大きさや境界条件の影響を大きく受けることを示した。また、円柱のような 3 次元的な現象となる物体まわりでは、反転現象は現れにくいことも示した。

次に、本数値計算法を有限の厚さを有する水平等温平板まわりの速度場と温度場の解析に適用し、局所および平均ヌッセルト数に及ぼす平板厚さおよび加熱面温度の影響を議論した。最後に、加熱物体として実用性が高い垂直円柱まわりの自然対流の速度場と温度場を数値解析し、ヌッセルト数を定量的に評価した。

第 1 章では、本研究の目的と背景および研究対象を述べている。

第 2 章の文献調査では、下向き水平平板からの自然対流に関して信頼できる測定値が得られている

Aihara らの実験について詳細に述べ、Aihara らが観察した流動様相(流れの反転)を再現することには成功していない他の研究者の数値解析による研究結果について述べる。さらに、本研究で使用した市販の汎用 CFD コードについて計算法等を述べる。

第 3 章では、Aihara らの実験に対応した下向き水平等温面からの解析結果について、実測された速度場と温度場が本研究で使用した CFD コードによる数値解析結果と良く一致することを述べ、実験条件より狭い幅の計算領域や異なる境界条件を設定した場合には、実験と計算は一致しないが、広い幅の計算領域の場合は同等の結果が得られることを明らかにした。なお、Aihara らの実験では加熱板を上面も加熱した状態で下向き面の測定を行っている。そこで、本研究では上面を断熱した場合に下面の流動と伝熱に影響が現れるかどうかを検討し、上面からの伝熱は下面の流動にはほとんど影響しないことを明らかにした。また、壁の無い自由空間を想定した計算では Aihara らの実験結果より流速が速くなり、伝熱特性も良くなることを示し、Aihara らの実験結果と比較することは意味の無いことを示した。さらに、領域を狭くとした計算結果から、Aihara らの実験結果とほぼ同等の結果が得られる計算領域と境界条件も明らかにした。

第 4 章では、さらに、Aihara らの実験で生じる平板全体の加熱による上面および側面に沿う流れの影響も数値的に検討した。第 3 章が Aihara らの実験に合わせた薄い平板について述べたのに対し、平板厚さをパラメータとして同様の方法で数値解析し、厚さの影響による流動様相の変化、温度場の変化及びヌッセルト数の変化を数値的に明らかにした。その結果、流動は厚さが Aihara らが実験に用いた平板厚さの 3 倍までは類似の傾向を示すが、4 倍あたりから上面の板幅中心付近で流れの旋回が発生し、それに伴って上面の温度境界層、局所ヌッセルト数に変化が現れてくることが分かった。平均ヌッセルト数については板厚が増えても下面ではほとんど変化はないが、側面では流速が大きくなるため、増大する傾向にあり、上面では端部付近の流れの旋回領域が大きくなるため、減少する傾向にある。ただし、上面では流れの旋回が中心部にも発生してくると逆に大きくなる傾向がみられる。また、加熱面温度の影響については、薄い平板について解析した結果から、加熱面温度が高い場合がヌッセルト数が大きくなることを明らかにした。

第 5 章では、水平底面を有する垂直円柱まわりの自然対流について数値解析した結果を述べた。円柱高さ、加熱面温度およびプラントル数の違い(空気と水)が速度場と温度場に及ぼす影響について解析した。円柱高さを変化させた場合、水平底面への影響は小さいが、側面のヌッセルト数は、側面が高くなり流速が速くなるにつれて大きくなる。円柱高さを大きくすると、上面の流れが面に沿わなくなり流れの旋回が発生して温度場に大きく影響を与え、ヌッセルト数は小さくなることが分かった。加熱面温度を大きくすると、全体的に流速が速くなり、上面の流動と温度場に影響を及ぼし、ヌッセルト数は大きくなることが分かった。プラントル数が大きい水の場合には、空気の場合に比べ全体的に壁面に沿う流れになり、平均ヌッセルト数は、空気 비해非常に大きくなることが明らかとなった。

第 6 章は、第 3 章から第 5 章で得られた知見をまとめている。