

氏 名	崔 恒 碩
学位の種類	博士 (工 学)
学位記番号	工 博 第 2350 号
学位授与の日付	平成 16 年 3 月 23 日
学位授与の要件	学位規則第 4 条第 1 項該当
研究科・専攻	工学研究科機械工学専攻
学位論文題目	A Numerical Study on the Turbulent Flow and Heat Transfer in a Channel with a Wavy Undulated Bottom Wall (波形底面を有するチャンネル内の乱流と熱伝達に関する数値解析的研究)
論文調査委員	(主 査) 教授 小 森 悟 教授 吉 田 英 生 教授 牧 野 俊 郎

論 文 内 容 の 要 旨

波形面に沿う乱流は環境工学，熱工学分野で重要な流れであり，とくに波形面の伝熱特性は熱交換器の高効率化と関連して伝熱工学分野で重要である。本論文は，底面が流れ方向の波形面となっているチャンネル内の乱流と乱流熱伝達に関して LES (Large-Eddy Simulation) を応用して乱流構造と伝熱機構を検討するとともに，このチャンネル内流れの熱流動特性を予測するための乱れモデルとそれを用いた計算結果について検討した研究の成果を取り纏めたもので，8 章からなっている。

第 1 章は緒言であって，この分野における従来の研究を概括し，本研究の目的と意義を明らかにしている。第 2 章では，検討を施した流れ場に対する乱流モデルと温度場を計算する際にそれと組み合わせた代数式熱流束モデルについて説明し，また LES に使用した Dynamic Subgrid-Scale モデルの概要を記述している。第 3 章では，波形底面を取り扱うための非直交曲線座標系における基礎式と数値解析に使用したその差分式と計算手法，とくに時間発展項と対流項の取り扱い，圧力場を計算するための Poisson 式の計算法，格子配置法と境界条件について考察している。また第 4 章では，歪み速度，渦度ならびに渦の伸張速度の確率密度関数，渦の検出法と渦寸法などの渦の特性を記述するパラメータを含む本研究で用いた諸計量の定義とその計算法について説明するとともに，変動速度と変動温度の時系列に対する象限分け法について考察している。

第 5 章では，LES を使用して得た波形面を有するチャンネル内流れの流動特性について検討している。まず，平均速度場と乱れ強さや乱流せん断応力などの計算結果を DNS (直接数値解析) の結果と比較して，本研究で用いた LES が波形底面を有するチャンネル内流れの乱流構造を捉える上で有効であることを示したうえで，波形面近傍の乱流構造を吟味している。その結果として，登り傾斜面近傍では，流れが下流に向かって加速されることに基づいて，生起を繰り返す乱流渦が流れ方向に伸張され，このため縦渦の発生密度が増大すること，この縦渦の発生密度の増大に起因してスパン方向速度変動強さやレイノルズせん断応力が増大することを見出している。さらに，これらの現象は底面の波形振幅が大きくなるとより顕著になることを明らかにし，また波形面谷底部に発生する循環流バブル上部に形成されるせん断層内で乱れが付加的に生成され，そのことが，底面近傍の乱流構造に影響する一原因であることをも結論している。

第 6 章では，チャンネルの波形底面を加熱面とする伝熱系に対して LES を応用した数値解析を施して得た温度場特性について検討している。その結果，伝熱面上に第 5 章で検出された縦渦に平行な姿勢で，スピンドル形状をもつ局所的・瞬間的な伝熱促進領域が発生すること，この領域は縦渦の軸周りに誘起される下向き流れ域の直下に相当しており，主流域から低温の流体が高温伝熱面に向かって輸送されることが流域内の乱流熱輸送を増大させ，結果として伝熱面上での局所的な伝熱促進をもたらすことを見出している。また，この局所的・瞬間的伝熱促進によって時間平均伝熱促進がもたらされること，このため縦渦の発生密度が大きい登り傾斜面で時間平均ヌセルト数が大きくなることを明らかにしている。

第 7 章では，まず改良型 Park-Sung-Suzuki 非線形 $k-\varepsilon-f_\mu$ モデルを用いた計算結果を DNS の結果と対比し，その結果から同モデルが平行平板間チャンネル内乱流と波形底面をもつチャンネル内乱流双方の予測に適することを示し，ついで，この

乱れモデルに代数式乱流熱流束モデルを組み合わせることで波形面での伝熱特性を解析している。その結果を DNS の結果ならびに LES の応用によって得られた第 5 章ならびに第 6 章で記述した熱流動特性と比較して、この計算手法が波形底面を有するチャンネル内の温度場の解析に適することを明らかにし、また波形振幅などの伝熱面形状の変更による伝熱促進の実現が合理的に予測できることを明らかにしている。

第 8 章は結論であって、本研究の成果を要約している。

論文審査の結果の要旨

波形面に沿う乱流は環境工学、熱工学分野で重要であり、とくに波形面の伝熱特性は熱交換器の高効率化と関連して伝熱工学分野で重要である。本論文は、波形底面をもつチャンネル内の乱流と波形底面を加熱面とする場合の熱伝達に関して、LES (Large-Eddy Simulation) を応用して乱流構造と伝熱機構を検討するとともに、この流れの熱流動特性を乱れモデルを用いて計算した結果について検討し、その成果を取りまとめたものであり、得られた主な成果は次のとおりである。

- (1) 登り傾斜面近傍では、流れが下流に向かって加速される結果として、乱流渦が流れ方向に伸張され、この領域に縦渦が高い密度で発生する。波形面谷底部に発生する循環流バブル上部に形成されるせん断層内では、乱れの付加的生成がある。この縦渦と付加的な乱れ生成は、波形面近傍領域におけるスパン方向速度変動強さやレイノルズせん断応力の増大をもたらす。
- (2) 登り傾斜伝熱面上では、スピンドル形状をもつ局所的・瞬間的伝熱促進領域が縦渦に平行な位置に発生する。この領域は、縦渦の軸周りに誘起される下向き流れの直下に相当し、伝熱面上の局所的・瞬間的伝熱促進は、下向き流れによって低温流体が高温伝熱面に向かって輸送され、その結果として乱流熱輸送が活発化することによりもたらされる。
- (3) 登り傾斜面上の局所的・瞬間的伝熱促進領域の発生は、時間平均ヌセルトを増大させる。それゆえ、波形底面の波形振幅が大きくなると、より顕著な時間平均ヌセルト数の増大をもたらす。
- (4) 非線形 $k-\varepsilon-f_\mu$ モデルと代数式乱流熱流束モデルの組合せによって、波形面を有するチャンネル内流れの熱流動特性が合理的に予測できる。

以上、本論文は波形底面を有するチャンネル内の乱流と波形底面を加熱面とする場合の熱伝達に関して理論的検討を行って新しい知見を得たものであって、学術上、実際上寄与するところが少なくない。よって、本論文は博士（工学）の学位論文として価値あるものと認める。また、平成16年1月21日、論文内容とそれに関連した事項について試問を行った結果、合格と認めた。