

氏名	と かない ひで き 門 叶 秀 樹
授与学位	博士 (工学)
学位授与年月日	平成11年3月10日
学位授与の根拠法規	学位規則第4条第2項
最終学歴	平成5年3月 山形大学大学院工学研究科化学工学専攻修士課程 修了
学位論文題目	水平円柱群および水平面からの干渉を伴う自然対流熱伝達
論文審査委員	主査 東北大学教授 新井 邦夫 東北大学教授 松本 繁 東北大学教授 三浦 隆利

論 文 内 容 要 旨

第1章 緒 論

諸工業における設備や機器においては、“隣接して配置された複数の加熱物体の自然対流熱伝達”や“常温の物体が熱対流を防げる位置に近接している加熱物体の自然対流熱伝達”が問題となることも多い。前者の典型的なものは、自然対流式の管型熱交換器や工場内のユーティリティ配管網あるいはプロセス配管網等に見られる水平円柱群からの自然対流熱伝達で、この場合には、群を構成する個々の円柱周りに形成される温度場および速度場が相互に重畳し干渉し合う。一方、後者の具体例としては、各種電気・電子機器内に組み込まれた、IC基板などの発熱体からの熱伝達などが挙げられ、この場合には、発熱体上方の物体が伝熱空間を狭くしてしまうので対流が十分には発達できず、発熱体から受熱した流体の更新が大きく阻害されてしまう。このように、現実には加熱物体周りの自然対流熱伝達に対して何らかの干渉作用が随伴している場合が多いにも関わらず、現在参照し得る既往の伝熱研究の成果のほとんどは広い空間に置かれた単独物体の熱伝達に関するものという状況にある。したがって、工業におけるプロセスの省エネルギー化および機器の熱的設計において、干渉を伴う自然対流熱伝達は避けることのできない問題の一つであり、工学理論に基づいた干渉効果の理解と熱移動速度の定量化が急務と考えられる。

そこで本研究では、上記二種類の干渉を伴う自然対流熱伝達の具体例として、水平円柱群周りの境界層干渉を伴う自然対流熱伝達、ならびに上部空間が物体で限定された水平上向き円形加熱面からの自然対流熱伝達を取り上げ、熱伝達機構の解明と熱的設計方程式の導出を目的とした。

第2章 既往の研究

本章では、水平円柱群および水平面からの自然対流熱伝達に関する既往の研究を調査した。その結果、自然対流条件下で工業的に頻繁に用いられる円柱群である単列水平円柱群（円柱を鉛直面上に一系列に配置した単列垂直配列円柱群、水平面上に配置した単列水平配列円柱群および傾斜面上に配置した単列傾斜配列円柱群）についてさえも、未だ十分な知見が得られていないことがわかった。すなわち、単列垂直配列円柱

群に関するほとんどの研究は群全体の平均熱伝達係数の実験相関に主眼を置いており、個々の円柱周りの境界層の相互干渉についてはほとんど知見が得られていないことがわかった。また、単列水平配列および傾斜配列円柱群に関する研究では、群全体の熱伝達挙動を定性的に説明するに留まっており熱伝達係数の推定手段が提出されていないことも判明した。一方、限定空間における加熱水平面からの自然対流熱伝達に関する研究は、そのほとんどが密閉空間を対象としており、現実遭遇する機会の多い、加熱面と上部物体底面の間隙内で若干の流体更新がある場合については研究例が極めて少なく、間隙内の熱伝達機構も解明されていないことが判明した。

そこで本研究では、水平円柱群からの自然対流熱伝達については個々の円柱周りの境界層干渉の様相を明らかにし、得られた知見に基づいて熱伝達機構のモデル化と熱移動速度の定量化を図ることとした。また、熱伝達特性に及ぼす加熱面上部の物体の影響については、加熱面と上部物体の間の狭い間隙内の流動に立脚して熱移動機構の様相を明らかにし、熱伝達特性に及ぼす物体の寸法や配置条件の影響を定量化することとした。

第3章 水平円柱群の自然対流熱伝達

本章では、単列水平円柱群の自然対流熱伝達特性について主に考察した。

単列垂直配列円柱群については、先ず最も基本的な配列である垂直2本配列円柱群の熱伝達実験および流れの可視化実験によって、群を構成する個々の円柱周りの境界層干渉の様子を明らかにした。また、この結果に基づいて、下部円柱からの浮力流の影響を受けて複雑に変化する上部円柱の熱伝達係数の挙動を定性的に説明すると共にこれを定量化する熱伝達モデルを提出した。次いで、このモデルをより多数の円柱が垂直面上に一直列に配置された場合に対して拡張し、個々の円柱の熱伝達係数の推定法を提案した。この手法の妥当性は垂直5本配列円柱群に関する熱伝達実験で検証した。

単列水平配列円柱群については、最も基本的な配列である水平3本配列の熱伝達実験および流れの可視化実験により円柱周りの干渉の様相を明確にした。その結果を基に、簡単な考察から熱伝達係数を相関するための無次元数を導出し、これを用いて配列の中央に位置する円柱と外端に位置する円柱の各々に対して熱伝達係数を良好に表示する実験式を提出した。次いで水平9本配列の熱伝達係数の測定結果から、群の外端に位置する円柱を除く内側の個々の円柱の熱伝達係数が互いに大きな差異がなく、外端円柱とそれ以外の中央円柱群の熱伝達係数が個別に推定できれば工学上十分であることを指摘し、上記の実験式が多数の円柱を配置した単列水平配列円柱群にも適用可能なことを示した。

以上の垂直配列と水平配列を、配列面が水平面から任意の角度で傾斜している単列傾斜配列の2つの境界とし、垂直配列と水平配列に関する成果を利用して傾斜配列における個々の円柱の熱伝達係数と傾斜角との関係の定量化を行った。

さらに、碁盤目配列と千鳥配列についても若干の実験的考察を加え、単列配列との特性の相違を論じた。

第4章 限定空間における上向き加熱水平面の自然対流熱伝達

本章では、上向き円形加熱面の直上が室温の物体で限定された時の、物体と加熱面間の狭い間隙における自然対流熱伝達に考察を加えた。

先ず、伝熱面近傍を2次元のモデル空間で表し、この場における流れと熱移動の基礎方程式の数値解析から間隙内のフローパターン、温度分布および伝熱面上の局所熱伝達係数分布を与え、流れに立脚した立場から熱伝達機構に考察を加えた。その結果、間隙の増加に伴って熱移動機構が伝導支配から渦による対流伝熱へと変化し、ついには間隙内空気全体が常に更新される対流状態へと推移する様相を明らかにした。また、この推移の過程で条件に応じて間隙内に出現する渦や内部流体更新流れの強さを表す代表量を数値解析結果から見だし、これを含む無次元数が伝熱面上の局所的な熱伝達を支配していることを明らかにした。以上の検討は種々の寸法の伝熱面と対流干渉体の組み合わせについて行い、得られた知見の一般化を図った。本数値解析の妥当性は、平均熱伝達係数の実測および浮力流れの可視化実験の双方から検証すると共に、平均熱伝達係数を簡便に推定し得る実験相関式も提出した。本相関式はここで取り上げた円形伝熱面と垂直円柱型対流干渉体の直径の比には依存しない関数形であるが、平均熱伝達係数が直径比にほとんど依存しない事実は数値解析の結果からも確認し、またその理由についても言及した。

第5章 総括

本章では、各章の内容を総括した。

審査結果の要旨

諸工業における設備や機器において、“隣接して配置された複数の加熱物体の自然対流熱伝達”や“常温の物体が近接している加熱物体の自然対流熱伝達”での干渉伝熱が問題となることが多い。前者の例として、自然対流式管型熱交換器や工場内のユーティリティ配管網等に見られる水平円柱群からの自然対流熱伝達では、個々の円柱周りに形成される温度場・速度場が相互に重畳し干渉し合う。後者の例としては、IC基板からの放熱のように狭い空間に組み込まれた発熱体からの熱伝達が挙げられ、上部物体により発熱体からの対流の発達が大きく阻害されてしまう。このように、加熱物体周りの自然対流熱伝達は何らかの干渉作用を随伴することが多いが、既往の研究は広い空間に置かれた単独物体の熱伝達にほとんど限定され、上記の干渉効果に関する知見が少ないのが現状である。

本研究は、上記二種類の干渉を伴う自然対流熱伝達の解明と熱的設計方程式の導出を目的として、加熱水平円柱群および上部空間が限定された水平加熱面からの自然対流熱伝達について実験および理論の両面から考察を加えたものである。

第1章は、緒論であり、本研究の背景と目的を述べている。

第2章では、本研究に関連する既往の研究を調査し、水平円柱群および水平面からの自然対流熱伝達に関する従来の取り扱い手法をまとめると共に、本研究の位置付けを明確にしている。

第3章では、流れの可視化および詳細な伝熱実験に基づき単列円柱群の自然対流熱伝達特性を論じている。すなわち、単列垂直配列円柱群および単列水平配列円柱群について、個々の円柱の熱伝達係数を推定する熱伝達モデルを提案し、その検証を行っている。また、この二つの熱伝達モデルを組み合わせ、単列傾斜配列円柱群の熱伝達係数も相関している。さらに、多列配列の典型として碁盤目配列および千鳥配列も取り上げ、単列配列との熱伝達特性の類似点あるいは相違点を実験的に考察している。

第4章では水平円形加熱面からの自然対流熱伝達に及ぼす対流干渉体の効果を実験および支配方程式の数値解析の両面から考察を加えている。先ず、対流干渉体底面と伝熱面の間隙内の対流状態が間隙の増加と共に変化する様相を流れの可視化実験とナビエ・ストークス方程式の数値解析から明らかにしている。次に、この流れの様相とエネルギー方程式の数値解析から得た局所ヌセルト数との関連を論じて熱伝達機構を明確にすると共に、本数値解析と伝熱実験結果の良好な一致を検証し、広範囲な間隙変化に対応できる平均熱伝達係数の相関式を提案している。

第5章は本研究の総括である。

以上、要するに本論文は、詳細な実験と理論解析に基づき干渉を伴う自然対流熱伝達機構の解明と熱的設計方程式の導出を行ったもので、伝熱工学および化学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。