

氏名	ウァン チャンジェン 王 強 勝
本籍（国籍）	中 国
学位の種類	博士(工学)
学位記番号	工博 第280号
学位授与年月日	平成29年 9月25日
学位授与の要件	学位規則第5条第1項該当 課程博士
研究科及び専攻	工学研究科 機械・社会環境システム工学専攻
学位論文 題目	水中に置かれた水平な楕円形状伝熱管周りの凍結現象に関する研究
学位審査委員	主査 教授 廣瀬 宏一 副査 教授 柳岡 英樹 副査 教授 上野 和之

論 文 内 容 の 要 旨

環境負荷の低減や、原油価格の高騰に対応した省エネ化の達成と、省エネ化を目指したものづくりやエネルギー管理技術の検討は、持続可能な社会を作り上げる上で必要不可欠な機械システム工学の課題である。夏の気温上昇に対応した快適な生活を送るために、いまや冷房は必要不可欠な電化製品である。しかし、エアコンの消費電力は家庭の全消費電力の25%を占めるほどになっており、省エネ化に向け、エアコンで消費されるエネルギーの削減が必要である。そのための方法として、比較的余裕のある夜間電力を有効活用し、夜間に冷熱を蓄熱し、昼に冷房として使用することが考えられる。これによりエアコンで消費されるエネルギーを削減できる。

従来から、相変化物質（PCM: Phase Change Material）を用いた潜熱蓄熱が注目され、スタティック型やダイナミック型などの蓄熱熱交換器が使用されている。特に氷を用いる氷蓄熱システムは経済性、安全性、環境への影響など蓄熱システムとしてのPCMに求められる条件を満たしており、現在ではビルの空調システムとして利用されることが多い。氷蓄熱も潜熱蓄熱の一つであり、装置により安価な深夜電力を使用して蓄熱し、夏季の日中など電力負荷が大きい時間帯に蓄熱したエネルギーを使用することが出来るため、省エネルギーや電力需給の平準化への貢献が期待されている。とりわけ、水および氷による蓄熱は、水が簡単に入手できること、安全性が高いこと、比熱や潜熱量が大きいこと、冷房として使用するに十分な0℃で

の潜熱蓄熱が可能なことから、これまで盛んに研究が行われている。しかし、将来予想される省エネの推進に向け、今後より高い蓄熱性能を得るためには、蓄熱槽内部で発生する相変化物質の凍結融解現象について体系的な研究を行い、最適な熱交換器の形状を探っていく必要がある。

本研究では氷蓄熱熱交換器の設計最適化を目標として、蓄熱槽内の相変化物質の凍結現象のメカニズムの把握と、蓄熱槽の形状の相変化過程への影響の解明を目的とする。蓄熱装置や流下液膜式凍結濃縮装置の基本的なモデルでもある伝熱管周りの相変化現象に着目した。伝熱管周りの凍結過程に着目し、Single-domain modelとして潜熱を比熱に組み込む方法による数値解析を行い、特に水槽内の初期水温や伝熱管の形状、相互配置（主に水平方向軸間距離に着目）、水槽の大きさの変化や影響での氷生成の挙動や効率について調べた。

本論文の第1章では、研究背景を詳述するとともに、既往の研究事例や報告を取り上げ本論文の新規性ならびに研究手法について述べている。

第2章では、本研究において用いた数値解析法について説明した。使用した数値解析法は、将来的に千鳥配置など軸対称ではない管配置へ比較的容易に展開できる解析法であり、対称性を有さないモデルや管群モデルへの拡張性が考慮でき、本研究の目的のための解析手法として妥当であると考えた。

第3章では、本研究において数値解析を行った際、その妥当性を検証するために行った実験における実験装置および実験方法について詳しく説明した。

第4章では、まず実験により2本の伝熱管を同軸・異軸と配置したときの管周りの凍結挙動の特性を詳述した。特に、凍結層同士がブリッジングを起こした際、ブリッジング部分の成長が他の部分と比べて早いこと、また下部管に比べて上部管の凍結層が大きくなるという特性があることが分かった。また、管周りの凍結層は基本的には水温によってその成長挙動が決まること。さらにブリッジング後は凝固率の増加は鈍化することを明らかにした。実験との対比により、本解析手法の妥当性を確認した。また、水中に水平な伝熱管を2本配置し、水平方向軸間距離の変化の場合、管形状及び配置角度を変化させた場合、水槽サイズの変化の場合について、管周囲の相変化過程やそれに伴う水の対流挙動などについて、数値解析及び実験を行ない、水槽のアスペクト比が水中に置かれた水平な楕円形状

伝熱管周りの凍結現象に与えた影響を明らかにした。

第 5 章では、水中に置かれた 2 本の水平楕円形状伝熱管が同軸および異軸配置された場合において管周りの凍結現象とブリッジング時間について数値解析を行い、異軸配置においても同軸配置の場合と同様に楕円形状伝熱管のブリッジング時間は任意の管壁温度において初期水温をパラメータとすれば、上下管 x 方向軸間距離を変化させても軸間距離に対するブリッジング時間は類型化でき、ブリッジング時間の予測が可能であることを示した。

本研究で使用した解析は任意の管形状および、任意の管本数、さらには任意の配置に対して水以外を対象とした凍結過程のみならず融解過程に対しても解析することが可能な応用範囲の広い有用な手法であることから、管本数 3 本以上の管群とした場合や管の配置を変化させた場合における研究にも展開可能だと考えられる。こうした、多数本伝熱管の場合、凍結過程に伴う周囲の流れ場、温度場といった現象に関しては、より複雑な対流が生じ、その干渉が凍結現象にどのような影響を与えるかなどへの応用展開が期待できる。

論文審査結果の要旨

環境負荷の低減や、原油価格の高騰に対応した省エネ化の達成と、省エネ化を目指したものづくりやエネルギー管理技術の検討は、持続可能な社会を作り上げる上で必要不可欠な機械システム工学の課題である。夏の気温上昇に対応した快適な生活を送るために、いまや冷房は必要不可欠となっている。しかし、エアコンの消費電力は家庭の全消費電力の 25% を占めるほどになっており、省エネ化に向け、冷房などで消費されるエネルギーの削減が必要である。そのための方法として、比較的余裕のある夜間電力を有効活用し、夜間に冷熱を蓄熱し、昼に冷房として使用することが考えられ、相変化物質 (PCM: Phase Change Material) を用いた潜熱蓄熱が注目され、スタティック型やダイナミック型などの蓄熱システムが開発されている。特に氷を用いる氷蓄熱システムは経済性、安全性、環境への影響など蓄熱システムとしての PCM に求められる条件を満たしており、ビルの空調システムとして利用されることが多い。氷蓄熱も潜熱蓄熱の一つであり、安価な深夜電力を使用して蓄熱し、夏季の日中など電力負荷が大きい時間帯に蓄熱したエネルギーを使用するこ

とが出来るため、省エネルギーや電力需給の平準化への貢献が期待される。また、氷蓄熱システムは、水が簡単に入手できること、安全性が高いこと、比熱や潜熱量が大きいこと、冷房として使用するに十分な $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ で潜熱蓄熱が可能なることから、これまで盛んに研究が行われてきた。しかし、将来予想される省エネの推進に向け、今後より高い蓄熱性能を得るためには、蓄熱槽内部で発生する相変化物質の凝固・融解現象について体系的な研究を行い、最適な蓄熱システムを探っていく必要がある。

本研究は氷蓄熱システムの最適化を目標として、蓄熱槽内の相変化物質の凍結現象のメカニズムの詳細な把握を通して蓄熱槽の最適設計法の構築の一助となることを目指したものである。そのため、蓄熱装置や流下液膜式凍結濃縮装置の基本的なモデルでもある伝熱管周りの相変化現象に着目し、解析手法として **Single-domain model** を適用し、潜熱を比熱に組み込む方法による数値解析を行い、特に水槽内の初期水温や伝熱管の形状、相互配置（主に水平方向軸間距離に着目）、水槽の大きさの変化や、その影響による氷生成の挙動や凝固率について実験および数値解析により詳細に調べている。

第1章では序論として、研究の背景を述べ、第2章では数値解析手法を示した。第3章では実験装置及び実験方法について述べている。第4章で実験と解析結果を示すとともに、その比較と考察を行っている。まず、水槽内の初期水温を一定温度とし、垂直方向軸間距離を固定、水平方向軸間距離の変化、および管形状を円管から楕円管として2本の伝熱管周りの凍結現象や水槽内の流体の流れ場の様子を詳細に調べた。次に水槽の容積を一定として幅と高さを反転させ、初期水温や管形状等は同条件のもと、凍結現象や水槽内の流体の流れ場の様子を調べ、初期水温や管の形状、水平方向軸間距離、水槽のアスペクト比が氷生成の効率にどのような影響を及ぼすのかを詳細に調べた。さらに解析の妥当性を確認するため、伝熱管周りの凍結過程における伝熱現象について凍結界面形状および凝固率の時間変化などについて比較検討を行った。

第5章では凍結現象を総括するとともに2本の伝熱管周りの氷が結合するブリッジング現象について述べている。スタティック型の氷蓄熱装置では、成長した氷自体が熱抵抗となることに加え、伝熱管から成長した氷がブリッジングすると、氷界面の周囲長さが減少するなど蓄熱効率が低下するメカニズムを明らかにし

た。また、PCM として水を用いる場合、水槽下部に 4℃の水が滞留する領域があり、伝熱管の位置とこの滞留領域の関係が蓄熱効率に大きな影響を与えることを示した。氷蓄熱システムの最適化を目指すにはブリッジング時間の推定が非常に重要であり、ブリッジング時間の数値的予測の可能性ならびに伝熱管の配置がブリッジング時間に与える影響を明らかにした本研究の意義は大きいと考えられる。

また、本論文で使用した解析手法は任意の管形状、任意の管本数、管配置さらには任意の PCM に対して、凝固過程のみならず融解過程に対しても解析することが可能な応用範囲の広い有用な手法であることから、将来的な展開が期待できる。こうした多数本伝熱管を用いた蓄熱槽においても、2 本管相互の間の凍結現象やブリッジングが基本となることから水槽容器のアスペクト比などによる影響については本論文の研究結果が有用になり、蓄熱システムの改善を検討していくうえで大きな貢献をするものと期待される。

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。

原著論文名（1 編を記載）

Basic Study on Solid-Liquid Phase Change Problem of Ice around Heat Transfer Tubes
- Freezing Phenomenon and Prediction of Bridging Time around Two Elliptical Tubes -
Qiang-Sheng WANG, Koichi HIROSE and Takashi FUKUE
International Journal of Engineering Research and Development
Vol.13 No.3 pp.57-68.,2017-March