

学位論文題名

塩水中におかれた水平氷円柱の融解熱伝達に関する研究

学位論文内容の要旨

海水中の塩分濃度は、緯度、水深、偏西風および貿易風などの影響に基づき、地域により局所的に異なることが知られている。例えば、北大西洋よりも北太平洋の塩分濃度のほうが低いことなどが、一例として挙げられる。これは、貿易風により大西洋の水蒸気は、パナマ地峡を越え太平洋へと運ばれるが、一方、偏西風により運ばれる太平洋の水蒸気は、北アメリカ大陸の西側のコルディエラ山脈に阻まれ、再び太平洋に戻るためとされる。また、オホーツク海のように、大きな河川を有し、千島列島により外海と隔離されるような海域においては、河川から流れ出る淡水が表層近傍に密度躍層を形成し、流水の発生に寄与すると考えられている。塩水中における氷塊の融解は、これら流水や海洋中に流出した氷河などの融解時に観察される現象である。一般に、氷河や流水は白色を有し、太陽からの日射を効率的に反射する。また、氷自身が融解時に、融解潜熱を周囲から奪い、さらに、氷層下部を一定の温度以下に低下させない断熱効果をも有している。例えば、オホーツク海においては、冬季には氷層で覆われ、日射の60~70%が反射されるために、一月の平均海水面温度は-30℃程度であるのに対し、海面下2~3mでは、-1℃程度となることが知られている。このように、海水中における氷塊の融解には、氷層からの融水が周囲の温度および濃度場に大きく影響を与えるなど、気象学や海洋学の見地からも大変興味深い。しかしながら、流水の発生源とされる河口近傍や冰山密集海域のように、周囲流体濃度が種々変化する領域において、周囲流体濃度および周囲流体温度が、融解氷層形状、周囲流体の流動模様、および融解熱伝達挙動に及ぼす影響に関しては、全く検討がなされておらず、詳細な検討が望まれている。

さらに、冰山は、海面下の氷層が融解することに加えて、大気からの入熱、波の影響による熱伝達の促進、氷層中の気泡による融解面の熱伝達促進、および氷層内の温度分布による亀裂などの因子も加わって融解が進行する。また、北洋を航行する船舶の安全を確保するためには、氷塊の位置の把握に加えて、冰山が海水中において融解する際に観察される、重心の移動により冰山が回転する現象(ローリング)に関する基礎的資料が求められている。海水面下に存在する氷塊の割合が、ローリングに大きな影響を与えることについては検討されているが、周囲流体温度により、海面下の氷塊の融解がどの程度になるかは明かでなく、それらを知るための基礎資料となる、氷塊の水没深さが、氷塊の融解現象に及ぼす影響に関する検討は、ほとんどなされていない。それゆえ、ローリングに関する基礎資料を得ることを目的とし、塩水中におかれた氷円柱の融解において、氷円柱と塩水面の位置関係(水没深さ)が、氷円柱周囲の流動模様、融解氷層形状、および融解熱伝達におよぼす効果について、詳細な実験的検討を行う必要がある。

以上述べてきたように、塩化ナトリウムや糖類等の水溶液中で氷が融解する場合、溶液中において固体が液体へと相変化する過程において、固体周囲の溶液中では、温度変化および物質の拡散が同時に進行する、いわゆる二重拡散現象が観察される。その際、溶液の密度が温度および濃度に依存することから、固体周囲では複雑な流れ場が形成され、それ

が、物質および温度拡散に影響を及ぼすことになる。この二重拡散現象の工学的利用として、スタティック型蓄冷熱（氷蓄冷）システムの設計および制御などが考えられる。たとえば、蓄冷槽内の冷却管周囲に形成された氷層の周囲に、塩化ナトリウムなど水溶液を注入することにより、氷層同士の連結（ブリッジ）を妨げ、さらにその濃度によって氷層周囲の流れ場を操作し、融解時すなわち採冷熱時の伝熱特性を制御することの可能性が期待される。スタティック型蓄冷熱装置は、最近注目されている流動性を有する液状の蓄冷材（リキッドアイス）を使用する、いわゆるダイナミック型蓄冷システムよりも、蓄冷槽の容積に対する蓄冷熱量が大きいという利点がある。しかしながら、スタティック型氷蓄冷熱装置の採冷熱時の伝熱特性を制御するためには、氷蓄冷熱槽内の冷却管周囲に形成された氷層周囲の流体濃度および温度が、氷層周囲の流れ場および氷層の融解挙動に及ぼす影響に関して、先ず実験的に詳細な検討を行うことが必要となる。

さらに、実験的な検討とともに、数値解析により、種々のパラメータを変化させ、広範囲にわたりその影響を検討することが望まれる。また、塩水は0~2.5 wt%の濃度において、密度逆転を有するため、本研究のように温度が低い場合には、密度逆転の影響が問題となり、この効果についても考慮する必要がある。この様な現状に基づき、本論文では、氷塊の最も基本的なモデルである水平氷円柱が完全に水没している系を考え、非定常ならびに定常状態における融解熱伝達に関して、実験的ならびに数値解析的に詳細に検討している。

本論文は、7章より構成されている。第1章は、概説であり、第2章においては、従来の研究の紹介および本研究の意義について述べている。

第3章においては、周囲流体濃度および周囲流体温度が、塩水中におかれた氷塊周りの流れ場および氷層形状に及ぼす効果につき検討している。また、修正ヌセルト数に関する考察では、従来の水中における修正ヌセルト数と比較し、その物理的意味を明確にしている。さらに、氷層界面温度に関する実測値は、今後の解析的研究に関する重要な基礎的資料となることを明らかにしている。

第4章においては、水没深さが、融解する氷層形状に及ぼす効果につき検討し、その速度分布、濃度分布を実験的に求めている。平均融解速度に及ぼす水没深さの影響は、氷塊のローリングに関する基礎的資料となることを明らかにしている。

第5章においては、塩水中におかれた水平氷円柱の定常融解熱伝達について検討している。周囲流体温度、周囲流体濃度、および冷却円管表面温度の影響による熱伝達率の変化に関する結果は、スタティック型氷蓄冷熱装置の採冷熱時の伝熱特性を制御するための基礎的資料となることを明らかにしている。

第6章においては、塩水中に置かれた水平氷円柱の融解熱伝達に関して、融解界面近傍の温度応答を正確に計算することが可能な、境界固定法を用いて数値解析を行っている。数値計算の結果は、スタティック型氷蓄冷熱装置の採冷熱時の伝熱特性に関し、融解厚さを操作および制御する際の基礎的資料になることを明らかにしている。

第7章は結論であり、本研究において得られた結果を要約して述べており、塩水中におかれた水平氷円柱の融解に関する本研究の結果は、海水中の種々の条件下における氷塊の融解の予測のみならず、スタティック型の氷蓄冷熱システムの設計、開発に関する研究に対し、重要な今後の指針を与えることを述べている。

学位論文審査の要旨

主 査 教 授 福 迫 尚 一 郎
副 査 教 授 飯 田 誠 一
副 査 教 授 谷 口 博
副 査 教 授 石 黒 亮 二

学位論文題名

塩水中におかれた水平氷円柱の融解熱伝達に関する研究

海水中における氷塊の融解は、氷層からの融水が周囲の温度および濃度場に大きく影響を与えるなど、気象学や海洋学の見地からも大変興味深い。しかしながら、流氷の発生源とされる河口近傍や冰山密集海域のように、周囲流体濃度が種々変化する領域において、周囲流体濃度および周囲流体温度が、融解氷層形状、周囲流体の流動模様、および融解熱伝達挙動に及ぼす影響に関しては、全く検討がなされておらず、詳細な検討が望まれている。

また、北洋を航行する船舶の安全を確保するためには、氷塊の位置の把握に加えて、冰山が海水中において融解する際に観察される、重心の移動により冰山が回転する現象（ローリング）に関する基礎的資料が求められている。しかし、周囲流体温度により、海面下の氷塊の融解がどの程度になるかは明かでなく、それらを知るための基礎資料となる、氷塊の水没深さが、氷塊の融解現象に及ぼす影響に関する検討は、ほとんどなされていない。それゆえ、ローリングに関する基礎資料を得ることを目的とし、塩水中におかれた氷円柱の融解において、氷円柱と塩水面の位置関係（水没深さ）が、氷円柱周囲の流動模様、融解氷層形状、および融解熱伝達におよぼす効果について、詳細な実験的検討を行う必要がある。

以上述べてきたように、塩化ナトリウムや糖類等の水溶液中で氷が融解する場合、溶液中において固体が液体へと相変化する過程において、固体周囲の溶液中では、温度変化および物質の拡散が同時に進行する、いわゆる二重拡散現象が観察される。この現象の工学的利用として、スタティック型蓄冷熱（氷蓄冷）システムの設計および制御などが考えられる。たとえば、蓄冷槽内の冷却管周囲に形成された氷層の周囲に、塩化ナトリウムなど水溶液を注入することにより、氷層同士の連結（ブリッジ）を妨げ、さらにその濃度によって氷層周囲の流れ場を操作し、融解時すなわち採冷熱時の伝熱特性を制御することの可能性が期待される。しかしながら、スタティック型氷蓄冷熱装置の採冷熱時の伝熱特性を制御するためには、氷蓄冷熱槽内の冷却管周囲に形成された氷層周囲の流体濃度および温度が、氷層周囲の流れ場および氷層の融解挙動に及ぼす影響に関して、先ず実験的に詳細な検討を行うことが必要となる。

さらに、実験的な検討とともに、数値解析により、種々のパラメータを変化させ、広範囲にわたりその影響を検討することが望まれる。この様な現状に基づき、本論文では、氷塊の最も基本的なモデルである水平氷円柱が完全に水没している系を考え、非定常ならびに定常状態における融解熱伝達に関して、実験的ならびに数値解析的に詳細に検討している。

本論文は、7章より構成されている。第1章は、概説であり、第2章においては、従来の研究の紹介および本研究の意義について述べている。

第3章においては、周囲流体濃度および周囲流体温度が、塩水中におかれた氷塊周りの流れ場および氷層形状に及ぼす効果につき検討している。また、修正ヌセルトに関する考察では、従来の水中における修正ヌセルト数と比較し、その物理的意味を明確にしている。さらに、氷層界面温度に関する実測値は、今後の解析的研究に関する重要な基礎的資料となることを明らかにしている。

第4章においては、水没深さが、融解する氷層形状に及ぼす効果につき検討し、その速度分布、濃度分布を実験的に求めている。平均融解速度に及ぼす水没深さの影響は、氷塊のローリングに関する基礎的資料となることを明らかにしている。

第5章においては、塩水中におかれた水平氷円柱の定常融解熱伝達について検討している。周囲流体温度、周囲流体濃度、および冷却円管表面温度の影響による熱伝達率の変化に関する結果は、スタティック型氷蓄冷熱装置の採冷熱時の伝熱特性を制御するための基礎的資料となることを明らかにしている。

第6章においては、塩水中に置かれた水平氷円柱の融解熱伝達に関して、融解界面近傍の温度応答を正確に計算することが可能な、境界固定法を用いて数値解析を行っている。数値計算の結果は、スタティック型氷蓄冷熱装置の採冷熱時の伝熱特性に関し、融解厚さを操作および制御する際の基礎的資料になることを明らかにしている。

第7章は結論であり、本研究において得られた結果を要約して述べており、塩水中におかれた水平氷円柱の融解に関する本研究の結果は、海水中の種々の条件下における氷塊の融解の予測のみならず、スタティック型の氷蓄冷熱システムの設計、開発に関する研究に対し、重要な今後の指針を与えることを述べている。

これを要するに、著者は、塩水中におかれた氷塊の融解挙動を明らかにするとともに、その伝熱特性を制御するための基礎的資料を提供し、二重拡散相変化問題に対して有用な多くの知見を与えており、伝熱工学の進歩に貢献するところ大なるものがある。

よって著者は、北海道大学博士(工学)の学位を授与される資格あるものと認める。