

学位論文題名

A Study on the Melting Heat Transfer Characteristics of Ice Blocks
Immersed in Immiscible Liquid

(疎水性液体中に置かれた氷層の融解熱伝達に関する研究)

学位論文内容の要旨

物質の均一な相である固・気・液の三相は、温度、圧力、磁場、物質の成分などの外的変数によって、ある相から他の異なる相へ転移することは一般に広く知られている。各相がその状態を相互に変える、融解・凝固、蒸発・凝縮、ならびに昇華などの現象は、いわゆる一次の相転移現象であり、ギブスポテンシャルの一次微分量であるエントロピーなどが不連続に変化し、これがいわゆる相変化において潜熱を伴う原因となる。

このような、物質の相変化における潜熱は、一般に物質の見かけの温度変化に伴う顕熱に比べて大きく、かつ一定温度で熱の授受を行うことから、様々な分野における冷却や蓄熱に利用されてきた。たとえば、氷は物体の冷却や冷熱の貯蔵手段として、冷凍技術を持たない時代から用いられており、最近では、省エネルギーを目的として、余剰の電力等を用いて氷を製造し、これを冷凍・空調に用いる氷蓄冷熱システムが広く利用されている。

このような氷蓄冷システムにおいて、最近では、氷粒子と液体の固液混合体であるスラッシュアイスが蓄冷材として用いられ、その融解熱伝達に関する研究が報告されている。

スラッシュアイスは、微細な氷粒子を液体中に分散混合した物であり、液体のように流動性を有するという特徴がある。このため、配管による輸送や攪拌による熱伝達の促進が可能であるなど、従来の氷では考えられなかった利用方法が可能となる。また、スラッシュアイスを流動層とした固・気・液三相流動層型熱交換方式の採冷熱特性に関する実験的検討も行われている。従来のスラッシュアイスは、水溶液系、すなわち、ある濃度の水溶液と氷粒子の固・液平衡相である。従って、融解の進行にともない、液相の濃度が低下することが避けられず、融解時の濃度拡散に伴うエクセルギ損失や、融解後の低濃度の水溶液の処理が問題となる。

一方、油脂や多価アルコールなど、分子構造中に疎水基を持つ物質は、水と溶けあわないことがよく知られている。また、アルミニウムと鉛や鉛とシリコンなどの一部の金属の組み合わせでは、液相においても相互にほとんど拡散・混合しない。従って、たとえばスラッシュアイスを氷粒子と疎水性液体で生成することにより、融解後の液体の分離が容易になることが考えられる。また、融解のみならず、スラッシュアイスの生成過程においても、冷却された疎水性液を水中に噴霧して氷粒子を生成し、スラッシュアイスを実験的に連続生成する試みもなされている。

一般に液-液の二成分を分離する際には、蒸留・抽出・吸収などの操作を必要とする。しかし、二成分が液相において相互に拡散・混合しない場合には、かかるプロセスを経ること無く、双方の密度差によって容易に分離することが可能である。また、固相を融解させ液体として回収するプロセス、あるいは、氷層や霜層の融解などにおいては、固層をその液相と拡散しない液体中において融解させることで、気中において融解させる場合よりも融解熱伝達を促進することが可能である。このように、融解後の物質拡散を伴わない相変化現象は、工業的に関連する分野を多く有する重要な問題であると考えられる。

このような系の相変化問題においては、融解液が固層界面に形成する液膜または液滴の挙動

が融解挙動に大きく影響する事が予想される。また、融解した液が周囲に拡散しないため、従来の拡散を伴う融解挙動とは大幅に異なることが考えられる。

従って、先に述べたように、水溶液系スラッシュ氷の融解に伴う濃度低下を防いだり、また、固層の融解促進操作などに積極的に利用するためには、かかる系の融解挙動とそれに及ぼす諸因子の効果を詳細に把握する必要がある。しかしながら、これら液膜や液滴の挙動に関してはこれまで系統的検討がなされておらず、また、このような液膜または液滴の挙動を考慮に入れた融解問題の解析方法に関しても未だ検討されておらず、これまでかかる問題に対する伝熱工学的検討はほとんどなされていないようである。

このような現状に基づき、本論文では疎水性液体中における垂直氷平板、上向きおよび下向き氷層、ならびに水平氷円柱の融解に関して詳細な実験による検討を行った。さらに、疎水性液体中における水平氷円柱の融解に関する解析による検討を行った。

本論文は、7章より構成されている。第1章は序論であり、疎水性液体中における氷層の融解についての研究の意義を述べている。

第2章では、疎水性液体中における氷層の融解に関する従来の研究に関して、水中や水溶液中における氷層の融解に関する研究との関連において述べ、本研究の目的および位置づけを明らかにしている。

第3章では、疎水性液として植物油を用い、矩形容器内にて等温に保持された植物油中に、0℃以下の温度に保持した冷却面上に保持された垂直氷平板の融解挙動に関して実験を行なっている。疎水性液体の温度および氷層を保持する冷却面の温度条件が、氷層の融解熱伝達挙動ならびに周囲流体の流れ場に及ぼす影響に関して検討を行ない、氷層の融解量より氷層局所の融解熱伝達を算定するとともに、融解量に関する無次元変数を導入し、融解量を時間および融解潜熱に関する無次元整理式として与えている。

第4章では、植物油中における下向き水平氷平板の融解に関して実験を行なっている。第3章と同様に、疎水性液体の温度や氷層保持面の温度条件が、周囲流体の流れ場や融解挙動に及ぼす影響に関して検討を行ない、融解時の氷層形状の3次元性を考慮し、融解水を一定時間ごとに採取することにより平均融解量ならびに熱伝達率を算定している。また、融解水が氷層と疎水性液の界面に形成する液滴の挙動が融解熱伝達に及ぼす影響に関して詳細な検討を行っている。

第5章では、上向き水平氷平板の融解挙動に関して実験を行なっている。第4章と同様に、疎水性液体の温度や氷層保持面の温度条件が、周囲流体の流れ場や融解挙動に及ぼす影響に関して検討を行なうとともに、融解時の氷層形状の一定時間ごとにおける写真撮影結果より平均融解量ならびに熱伝達率を算定している。また、融解速度ならびに熱伝達挙動に関する無次元変数を導入しこれらの実験整理式を与えている。

第6章では、植物油中における水平氷円柱の融解挙動に関して、実験および解析による検討を行っている。水平同心二重円管の内管を冷却面としてその周囲に氷層を円柱状に保持し、外壁面を一定の高温に設定し、等温壁の温度条件で氷層の融解挙動および周囲流体の流れ場の検討を行っている。また、解析においては、融解水と周囲流体の二重境界層を想定し、融解初期における熱伝達に関する検討を行っている。

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、本研究における、氷層の様々な状況下における疎水性液体中の融解挙動に関する研究結果は、疎水性液体を用いたスラッシュアイス氷蓄冷システムのみならず、不溶性物質を利用した融解熱伝達制御に関する研究に対する重要な今後の指針を与えるものであ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 宮 本 登
副 査 教 授 菱 沼 孝 夫
副 査 教 授 工 藤 一 彦

学位論文題名

A Study on the Melting Heat Transfer Characteristics of Ice Blocks Immersed in Immiscible Liquid

(疎水性液体中に置かれた氷層の融解熱伝達に関する研究)

近年、氷蓄冷システムにおいて、従来の水溶液系スラッシュアイスにおける、融解の進行にともなうエクセルギ損失、融解後の低濃度の水溶液の処理等の問題から、氷粒子と疎水性液体より生成したスラッシュアイスを利用することが検討されている。また、不溶性液体を用いた融解促進や霜層の除去など、不溶性液中における固層の融解問題は様々な分野に関連しており、かかる問題においては、固層界面に形成する融解液膜または液滴の挙動が融解挙動に大きく影響する事が予想され、また、従来の拡散を伴う融解挙動とは大幅に異なることが考えられる。

本論文はかかる問題に対する基礎資料を与えることを目的として、疎水性液体中における氷層の融解に関して、種々の形状の氷層について詳細な実験ならびに解析による検討を行ったものであり、疎水性液体として植物油を用い、疎水性液中における垂直水平板、水平水平板、および水平氷円柱の融解に関する詳細な実験より、氷層表面に形成する融解液膜の挙動を明らかにし、周囲流体の流れ場と融解液膜の流れが相互に影響することにより氷層の融解挙動に大きな影響を及ぼすことを見出し、融解水が蓄積して形成される液滴の分布、液滴の形成から落下までの挙動が融解熱伝達に及ぼす影響を明らかにしている。

また、氷層の融解形状、および一定時間ごとに採取した融解水量の双方より、平均融解量を測定し、融解熱伝達率を与えるとともに、それぞれの氷層形状について、融解量を時間および融解潜熱に関する無次元整理式として与えており、本研究における、氷層の様々な状況下における疎水性液中の融解挙動に関する研究結果は、疎水性液体を用いたスラッシュアイス氷蓄冷システムのみならず、不溶性物質を利用した融解熱伝達制御に関する研究に対する重要な今後の指針を与えるものである。

さらに、本論文は、疎水性液中における水平氷円柱の融解に関して、融解水と周囲流体の二重境界層解析モデルを提案し、解析手法が疎水性液体中における氷層の融解熱伝達挙動を記述する事ができる適用範囲を明らかにし、今後の解析的検討の指針を与えている。

これを要するに、著者は、疎水性液体中における様々な形態の氷層の融解挙動に関して伝熱工学的立場より研究を展開し、相変化蓄熱などにおける工業上有益な新知見を得たものであり、疎水性液体を用いたスラッシュアイス氷蓄冷システムのみならず、不溶性物質を利用した融解熱伝達制御に関する研究に対する重要な今後の指針を与えるものであり伝熱工学の進歩に対して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。