

振動冷却面上における

凍結層生成・剥離機構に関する研究

学位論文内容の要旨

自然界における水や水溶液の凍結現象は、寒冷地においては日常的になじみが深い現象であり、湖沼の表面に張る氷や軒下に生成される氷柱、あるいはオホーツクに流れ着く流氷など、多くの事例に見ることができる。このような現象の工業的な応用は、食品の冷凍や解凍技術、血液および生体の凍結保存や凍結解除に関連する医学分野、海水の凍結分離による淡水化工業、凍結乾燥あるいは空調分野など、さまざまな分野に関わっている。

夏期に高温多湿となる我が国では、空調機の普及に伴い電力需要も増加の一途を辿っており、増大する電力需要に如何にして対処するかが大きな社会的問題となっている。このため、近年、夜間の余剰電力を利用して氷を製造し、空調が必要な時間帯に氷の冷熱を利用する氷蓄熱システムの普及が進められている。これまで、このようなシステムでは、水を用いて冷却管周りに氷を生成させ、採熱時にその融解潜熱を利用するスタティック型システムが主に用いられてきたが、製氷時に氷が成長するため製氷効率が低下することや、氷圧の増大に伴い熱交換器の破損が起こる場合があること、一方、採熱時には冷却管周りの融解水により採熱効率の低下が起こること、などの工学的問題が指摘されている。

最近では、冷却管周りに静的な状態で製氷する方法ではなく、水あるいは水溶液中に氷結晶を分散した固液混合体であるスラッシュアイスを用いたダイナミック型氷蓄熱システムに関心が集まっている。スラッシュアイスは液体のように流動性を有するため、採熱側に直接輸送することが可能であり、そのため、採熱効率や負荷への追従性に優れている。また、水溶液を利用する場合には、濃度を制御することにより融解温度の異なるスラッシュアイスが生成できるなどの利点が生まれる。

水溶液の凍結には、温度および濃度拡散が関与するため、水の凍結現象に比較して非常に複雑な挙動を呈する。また、空調分野において多用されるエチレングリコールなどの水溶液では、濃度拡散は熱拡散に比較して非常に小さいため、凍結に際しては凍結界面の高濃度溶質の影響を受け、「構成的過冷却」と呼ばれる過冷却現象が起きて針状凍結層を生み易いこと、また、そのような凍結層は、純氷と高濃度の水溶液から構成されるいわゆるマッシー氷となるため、水より得られる氷の構造が密であるのに対して、疎となる構造を持つこと、などが知られている。

水溶液より得られる凍結層が持つこのような性質を利用して、冷却面より凍結層を剥離するスラッシュアイス生成法に関する実験的検討がなされている。このような凍結層生成・剥離を伴うスラッシュアイス生成においては、凍結層生成に関与すると考えられる水溶液濃度、冷却条件、および流れ場条件のみならず、凍結層と冷却面との付着に基づく剥離機構が現象の挙動に大きく影響を及ぼすと予想される。

凍結層の剥離を促進するためには、凍結層に大きな外力を与えると同時に付着力を低下させることが必要である。その方法の一つとして水溶液中において冷却面を振動させるという方法が考えられ、この場合、凍結層には流体力と同時に慣性力が作用し、また、界面近傍の濃度境

界層が振動流れ場の影響を受け凍結挙動が変化するものと考えられる。これらの効果は、凍結層生成・剥離現象に関して従来の方法とは異なる挙動を与えることが予想される。さらに、冷却面表面性状を制御することにより付着力を低減できる可能性が考えられる。したがって、このような方法によりスラッシュアイスを効率良く得るためには、かかる系の凍結挙動および凍結層の剥離挙動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、水溶液中において冷却面の加振運動を伴う場合の凍結挙動に関しては未だ検討されておらず、また、凍結層の剥離メカニズム、およびそれに及ぼす冷却面表面性状や他の因子の影響に関しても系統的な検討はなされていないのが現状であり、これまでかかる問題に対する伝熱工学的立場からの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、本研究では、振動冷却面による新たなスラッシュアイスの連続生成法に関する基礎資料を提供することを目的として、連続回転冷却管、振動回転冷却管、ならびに振動平板による水溶液の凍結層生成・剥離挙動に関して実験による検討を行うとともに、冷却面表面性状の凍結挙動に与える影響について検討を加えた。さらに、凍結層の剥離、およびそれによるスラッシュアイス生成量に関して解析的検討を行った。

本論文は、7章より構成されている。第1章は序論であり、水溶液中に置かれた振動冷却面よりのスラッシュアイス生成に関する研究の意義と本研究の概要を述べている。

第2章では、スラッシュアイス生成に関する従来の研究について、機械的および熱的操作により水中及び水溶液中に氷粒子を生成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、運動冷却面として、一方向連続回転、および振動回転という駆動方式の異なる2種類の冷却管を用いてエチレングリコール水溶液の凍結挙動に関して実験を行い、冷却面運動に伴いスラッシュアイスが生成されることを明らかにするとともに、それぞれの駆動方式に基づく凍結挙動の違いを示している。また、水溶液濃度条件、冷却条件、および冷却面運動条件が凍結挙動に及ぼす影響に関して検討を加えている。さらに、スラッシュアイス連続生成条件について、無次元数を導入することによりその生成領域を整理・分類している。

第4章においては、凍結挙動の観察が容易な平板冷却面を用いて、振動冷却面上における凍結挙動および凍結層の剥離挙動をより詳細に検討し、冷却面振動条件、冷却条件、および水溶液濃度条件により凍結層生成・剥離挙動には3つのパターンが存在することを示すとともに、これらの挙動に及ぼす諸因子の効果を明らかにしている。また、第3章と同様に、スラッシュアイスが連続生成される領域を無次元数により整理・分類している。

第5章では、凍結層と冷却面との付着を能動的に制御する観点から、冷却面の表面性状が水溶液の凍結挙動および剥離挙動に与える影響に関して実験的な検討を行っている。実験では、第4章と同一の実験装置を用いて、冷却面材質表面に撥水处理および親水处理を施し、これらと無処理面を比較検討することにより表面性状の効果を明らかにしている。さらに、凍結層と冷却面との付着機構に関して、凍結層の表面エネルギー変化に着目した付着モデルを提案するとともに、表面性状が凍結層の付着エネルギーに与える影響について定性的な説明を与えている。

第6章では、振動冷却面上における凍結層に作用する外力を解析し、剥離に支配的な因子を明らかにするとともに、第5章の付着モデルを用いて、冷却面運動条件、水溶液濃度条件が凍結層の剥離に及ぼす影響について検討を行っている。また、凍結層を固液共存層として扱い、それに作用する外力、および凍結層付着エネルギーより、凍結層剥離によるスラッシュアイス生成量を解析的に検討し、実験結果との比較検討を行っている。

第7章は結論であり、本研究で得られた結果を要約して述べている。

学位論文審査の要旨

主査	教授	福迫	尚一郎
副査	教授	菱沼	孝夫
副査	教授	宮本	登
副査	教授	工藤	一彦
副査	助教授	山田	雅彦

学位論文題名

振動冷却面上における

凍結層生成・剥離機構に関する研究

空調機器の普及やO A機器の増加に伴って増大する電力需要に対処するため、近年、夜間の余剰電力を利用して氷を製造し、空調が必要な時間帯に氷の冷熱を利用する氷蓄熱システムの普及が進められており、最近では、水あるいは水溶液中に氷結晶を分散した固液混合体であるスラッシュアイスを用いた熱媒体として利用するダイナミック型氷蓄熱システムに関心が集まっている。スラッシュアイスの連続生成方法に関しては様々な方式が検討されているが、連続生成と効率という実用上の観点から十分に有効な方法は未だ確立されていないのが現状である。

本論文は、スラッシュアイスの新たな連続生成法として振動冷却面を利用する方法を提案し、水溶液中において冷却面の加振運動を伴う場合の凍結挙動および凍結層の剥離メカニズム、また、それに及ぼす冷却面表面性状や他の因子の影響に関する基礎資料を提供することを目的として、一方向連続回転垂直冷却管、振動回転垂直冷却管、および往復振動垂直冷却平板という駆動方式の異なる冷却面を用いてエチレングリコール水溶液の凍結挙動に関して実験を行い、冷却面運動に伴いスラッシュアイスが生成されることを明らかにするとともに、それぞれの駆動方式に基づく凍結挙動の違いを示している。また、水溶液濃度条件、冷却条件、および冷却面運動条件が凍結挙動に及ぼす影響に関して検討を加えている。さらに、スラッシュアイス連続生成条件について、無次元数を導入することによりその生成領域を整理・分類している。

また、本論文では、凍結層と冷却面との付着を能動的に制御する観点から、冷却面の表面性状が水溶液の凍結挙動および剥離挙動に与える影響に関して検討を行い、冷却面表面性状の効果を明らかにし、冷却面の表面エネルギー変化に着目した凍結層付着モデルを提案するとともに、表面性状が凍結層の付着エネルギーに与える影響について詳細な検討を行っている。

さらに本論文では、上記の付着モデルを用いて、冷却面運動条件、水溶液濃度条件が凍結層の剥離に及ぼす影響について解析による検討を行なうとともに、凍結層に作用する外力、および凍結層付着エネルギーより、凍結層剥離によるスラッシュアイス生成量を解析的に検討している。

本研究における振動冷却面上における水溶液の凍結層生成および剥離機構に関する研究結果は、新たなスラッシュアイス生成方法とその最適生成条件を与えるのみならず、水溶液中の固体冷却面に対する氷結晶の付着に関する研究に対して重要な指針を与えるものである。

これを要するに、著者は振動冷却面上における凍結層の生成・剥離機構に関して伝熱工学的立場より研究を展開し、スラッシュアイスの生成促進ならびに凍結層の剥離制御など工業上有益な新知見を得たものであり、スラッシュアイスの生成のみならず液体中における氷結晶の付着防除などに関する研究に対して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

するところ大である。

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。