

氷スラリーを利用したチルド水供給システムに関する研究

A Study of Chilled Water Feeder System by using Ice Slurry

三戸 大介

Daisuke Mito

研究の目的

本論文では、ダイナミック型氷蓄熱システムの食品工業分野への適合性向上に資することと同時に、チルド水供給システムとしての普及に資することを目的として、以下に記す従来には無い新しい技術を開発する。

- (1) 製氷運転と解氷運転を同時に行うシステムに対するチルド水温度の予測モデル
- (2) チルド水の温度を低温で安定供給するための食品工場独特の運転制御方法
- (3) 製氷部の密閉化技術

これらの新しい開発の実用性が確認できれば以下が可能となり、ダイナミック型氷蓄熱システムの食品分野への応用に対する適合性が生まれることになる。

- (1) 製氷運転と解氷運転を同時に行うシステムに対する解氷特性の予測技術を確立することで、食品工場に必要なチルド水温度に応じたシステムの最適設計が可能となる。
- (2) チルド水の温度を低温で安定供給するための食品工場独特の運転制御方法が確立できれば、製氷運転と解氷運転を同時に行うシステムを自動化することが可能となる。
- (3) 上記 (1) と (2) の技術によって、チルド水温度の安定性が向上し、生製品の品質向上に寄与できる。
- (4) 製氷部の密閉化技術が確立できれば、蓄氷槽と製氷機を同一レベルに設置することができるため、ダイナミック型氷蓄熱システムを食品工場へ導入することが可能となる。また、蓄熱水への異物混入など衛生上の危害要因を低減することが可能となる。

研究の課題

食品工場では、24時間連続して間欠的な負荷が発生するため、空調用氷蓄熱システムのように製氷と解氷の明確な運転時間帯の区分けが無い。このため製氷と解氷の運転が同時に行われることになる。そこで本論文では、まず、製氷と解氷の同時運転を行うシステムに対する解氷特性の解明を研究の対象にした。また、チルド水の温度を低温で安定に制御するための運転制御方法の獲得を研究の対象にした。さらには、過冷却方式のダイナミック型氷蓄熱システムを食品分野でのチルド水送水システムとして用いるためには、製氷部の密閉化は重要であり、その実現のために必要な要素技術の獲得も研究対象とした。

製氷と解氷の同時運転を行うシステムに対する解氷特性の解明については、解氷のみを対象にした研究は広範囲に行われているものの、製氷と解氷を同時に行う場合の予測について扱った研究は見当たらない。従来の空調用システムにおける予測方法を修正することで、製氷解氷同時運転下での取り出し水温の予測に拡張が可能かどうかは、実規模スケールの実験装置による確認が必要である。

製氷と解氷の同時運転での運転制御方法に関する問題として、第一に蓄熱量の計量が挙げられる。蓄氷量の増減に応じて自動的に製氷運転を発停させるためには、蓄氷量を常時正確に計量する必要があるが、*IPF20%*以上

の氷層は水に浮いた状態ではないため、蓄氷槽内の水位の変化から蓄氷量を計測することはできない。また、蓄熱槽内は0℃のため、温度変化の情報から蓄氷量を常時直接測定することもできない。そこで、蓄熱槽に流出入する水の温度と流量から熱量演算によって蓄氷量を把握し、演算による累積誤差は、氷層の盛り上がり高さが一定の高さの達した時点で予め決めた値にリセットする方法を検討した。このような蓄氷量の計量方法を実現するためには、氷層の盛り上がり高さとの再現性を知る必要がある。

第二に蓄熱水の補充の問題が挙げられる。食品工場では機器のメンテナンス等によって蓄熱水が定期的または不定期に排出されることで、蓄熱水の量は減少するが、チルド水の送水温度維持のために、蓄氷槽内に常時シャベット状の氷が充填された状態を維持するため、蓄氷槽の水位の変化から直接的に蓄熱水の減少量を計量することはできない。そこで、満蓄状態での氷層の空隙率を実規模スケールの実験装置を使って調べ、水位の変化から蓄熱量の減少量を計量する方法について検討した。

製氷部の密閉化に関しては、以下の課題がある。まず第一に、密閉空間の中で過冷却水から相変化を誘発させる技術が必要である。第二に、配管内での氷の付着による閉塞を防止するために製氷装置内の限られた容積内で相変化を完了させることが必要である。そのためには過冷却解除に必要な滞在時間を把握することが重要である。第三に、過冷却状態と相変化という、相反する物理現象を連続した空間内で長時間維持・分離するための技術を獲得する必要がある。第四に、過冷却器内での不測の過冷却解除（凍結）を防止することが必要である。本論文では、工業的に幅広く用いられているプレート式熱交換器を過冷却器として用いる場合の凍結メカニズムを解明し、その防止方法について論じる。

研究の構成

本論文では、まず①製氷・解氷同時運転を行うシステムに対する解氷特性の予測技術の提案と実用性の評価を実施し、次いで、②チルド水の温度を低温で安定供給するための製氷・解氷同時運転での運転制御方法の提案と、要素技術の実用性について検討する。また、③製氷部の密閉化技術について提案し、要素技術を確立するための検討を行う。最後に、④実用設備での運用実績を用いた本研究開発の実用性評価を実施することで、食品分野への適合性が高い、ダイナミック型氷蓄熱システムによるチルド水供給システムの開発に資することにした。本論文の構成と具体的な検討内容は以下の通りである。

■ 第1章

第一章では、本研究・開発の背景と氷蓄熱に関する従来の研究について概説する。また、本論文の目的および構成について述べる。

■ 第2章

第2章では、まず、空調用氷蓄熱システムでの解氷モデルを基にした修正モデルについて説明する。次いで、食品工場の間欠負荷を模擬した製氷・解氷同時運転での取り出し水温の予測精度を評価した結果を説明する。次に、製氷・解氷同時運転を行うシステムで蓄氷量を管理するための運転制御方法である、満蓄制御について説明する。ここでは、満蓄制御を実現する上で重要な知見である *IPF*（氷充填率）と盛り上がり高さとの再現性について実用規模の実験装置を使って調べ、実用性の評価を行った結果を示す。次いで、蓄氷槽の保有水量を一定に保つための運転制御方法である、給水制御について説明し、本制御を実現する上で重要な満蓄状態での氷層の空隙率を、大型の実験装置を用いて計測した結果を説明する。なお、氷層の空隙率に対する装置のスケールの影響を調べるために、スケールの異なる2種類の装置にて同様の実験を実施して、本制御の実用性の評価を行った結果を示す。

■ 第3章

第3章では、まず最初に製氷部を密閉化するための要素技術であるトリガー技術に関する検討を行う。過冷却を能動的に解除するための方法として、超音波を用いる方法を取り上げ、種結晶方式との比較実験を通じて実用性の評価を行った結果を示す。次いで、密閉配管内での閉塞を防止して連続製氷状態を維持するための方法を検討するために、過冷却解除の進行状態に関する実験結果を説明し、連続的な製氷状態の維持（完全解除）に必要な過冷却解除の滞在時間や、超音波の照射条件について論じる。

■ 第4章

第4章では、製氷部を密閉化する際に問題となる、上流伝播を防止するための技術について論じる。上流伝播とは、解除器内の相変化が管壁上を伝って上流側の過冷却器（熱交換器）に向かって伝播する現象である。その解決方法として、配管内壁面上に0℃以上の水を供給し、相変化の伝播経路を断つ手法を提案する。供給する水の量を必要最小限にするためのスリット形状について論じ、数値計算による配管内壁面の温度分布の結果から最適なスリット形状を推定した結果を示す。また、伝播防止効果を調べる実験を実施し、最適なスリット形状を示すとともに、伝播防止効果を得るための流動条件を示す。また、本章で論じる伝播防止方法と、3章で論じる超音波によるトリガー技術および完全解除技術を統合し、改良を加えた密閉型製氷機について説明する。

■ 第5章

第5章では、プレート式熱交換器を使って過冷却水を安定に製造する方法についての検討を行う。プレート式熱交換器は、単位体積あたりの伝熱面積が大きく伝熱性能が良いため、シェルアンドチューブ式熱交換器を使う場合に比べて伝熱面上での最大過冷却度を小さくすることができる。しかし、筆者の見解では、不測の凍結が発生する頻度はプレート熱交換器の方が圧倒的に多い。特に、製氷機を密閉式とした場合に、解除器下流の配管内で壁面に付着した氷が剥がれるなどして圧力変動が発生した直後に、高い確率で凍結が発生する。この凍結原因に対する仮説として、筆者は水の圧力変動によってプレート式熱交換器内のプレートが移動・変形し、過冷却水が流れる流路内でプレート同士が衝突するのが原因と考えた。この仮説を検証するために、まず、プレート式熱交換器を循環する2流体間の差圧を変えた時に抵抗係数が変化することを実験的に示し、圧力変動によって熱交換器内でプレートの移動・変形が起こりうることを示す。次に、2流体間の差圧を変えた長時間製氷実験を行い、凍結頻度と差圧条件との相関を調べた。その結果、プレート熱交換器内で不測の凍結を起こさないための圧力条件を明らかにする。

■ 第6章

第6章では、本論文の研究・開発成果の実用性評価を行う。まず、本論文の研究・開発成果に基づいて構築したシステムを食品工場に導入した事例の概要を説明し、その設計方法を説明する。次いで、実際の食品加工プロセスで発生した熱負荷を処理した際のチルド送水温度データを使って送水温度の安定性を評価した結果を示し、本論文で提案する解氷特性の予測技術の実用性を評価する。また、満蓄制御ならびに給水制御の稼働状況を説明し、本制御と密閉型製氷技術の実用性評価を行う。最後に、2章で検討した修正予測モデルを用いて、水蓄熱システムでチルド送水システムを構築する場合のシステム容量等の試算を行い、氷蓄熱システムの優位性を示す。

■ 第7章

第7章は、本論文の総括である。

研究の成果

① 製氷運転と解氷運転を同時に行うシステムに対する解氷特性の予測技術に関する成果

- (1) 空調用氷蓄熱の解氷モデルに、製氷運転による蓄氷槽内部の温度変化の影響を加味した修正モデルを作成した。また、本モデルを使って、製氷・解氷同時運転時のチルド水温度を $+0.5^{\circ}\text{C}$ の精度で予測できることを確認した。

② チルド水の温度を低温で安定供給するための食品工場独特の運転制御方法に関する成果

- (1) 氷層の盛り上がり高さを計測することより、満蓄状態が判断できることがわかった。また、満蓄制御の実用性を確認した。
- (2) 給水制御の検討結果より、蓄氷槽の水位変化から氷層の空隙率に基づいて、補給水量を算出できることがわかった。また、給水制御の実用性を確認した。

③ 製氷部の密閉化技術に関する成果

- (1) 超音波は、過冷度が 0.3K 程度で解除トリガーとして確実に機能し、種氷結晶と同等の性能を有する。
- (2) 配管での閉塞を防止して連続的な製氷状態を維持するためには、解除トリガー付与後に解除器内で 4.1 秒以上滞在させることが必要である。
- (3) 伝播防止器のスリット形状をラウンド型とし、スリット間隔を $1\sim 3\text{mm}$ とした場合には、吹き出し流速を 0.3m/s 以上とすることで、過冷却水の流速によらず伝播防止効果が得られる。
- (4) プレート式熱交換器を過冷却器として用いる場合、熱交換器内全域での局所プレート間差圧が 0 以上になるように運転圧力を設定することで、不測の凍結を防止できる。

結論

本論文の研究開発成果に基づいて構築したシステムを食品工場に導入し、動作の検証を行った結果、健全な動作を確認した。この結果により、本論文の研究開発成果が、ダイナミック型氷蓄熱システムの食品工業分野への適合性向上に対して非常に効果があることを明らかにした。

以上より、本論文の研究開発成果が、ダイナミック型氷蓄熱システムのチルド水供給システムとしての導入普及だけでなく、食品工場での生産品の品質改善、エネルギーの効率的な利用に資することができる成果であることを確信する。

参考文献

- (1) 三戸大介, 万尾達徳, 谷野正幸, 松本浩二 : 氷スラリーによるチルド水供給設備に関する研究, 冷空論, 30(3), pp.319-329, (2013.5).
- (2) 三戸大介, 万尾達徳, 谷野正幸, 本郷大, 若佐和夫, 松本浩二 : 乳製品加工工場における氷スラリーによるチルド水供給設備, 冷空論, 30(3), pp.331-339, (2013.5).
- (3) 三戸大介, 小澤由行, 谷野正幸, 稲田孝明 : 水の過冷却解除に関する能動制御技術の開発, 冷空論, 17(2), pp.191-201, (2000.2).
- (4) D. Mito, T. Mano, M. Tanino, M. Hongo, K. Wakasa, K. Matsumoto. :Chilled Water Feeder by using Dynamic Ice in a Dairy Product Plant, Proc. of the 12th Annual National Seminar of Mechanical Engineering (International Session), pp.1396-1405, (2013.10).

以上