

学位論文題名

自然氷の冷熱エネルギー利用における 製氷管理技術に関する研究

学位論文内容の要旨

北海道は日本で最も寒冷な地域であり、雪氷、凍土等の冷熱資源が豊富に存在する。今までこれら雪氷等は生活面で厄介な存在であったが、現在は、地球温暖化防止を目的とした省エネ対策あるいは自然エネルギー利用という観点から、雪氷等を冷熱資源とみなし、その冷熱を農産物の低温貯蔵や建物冷房に活用する試みが進められている。その中でも、アイスシェルターと呼ばれる自然氷を利用したシステムは、冬に自然冷気で貯氷タンクの水を凍らせ、その氷を夏に解かすというサイクルを繰り返すことによって、一年中安定した低温環境の創出が可能になるため、農産物の長期低温貯蔵への利用が期待されている。しかし、現在導入されているアイスシェルターの実験施設は、製氷管理技術が不十分なため冬期に十分な製氷が行えず、計画量の氷が得られないという不備が生じている。したがって、このシステムを完成させ、普及させるためには、地域の冷熱量を定量的に把握し、その冷熱量に見合った大きさの貯氷タンクを選定することが重要である。またそれをベースに、自然冷気を効率よく利用する製氷管理技術を確立することが必要である。しかし、アイスシェルターの製氷管理技術に関する研究は、ほとんど行われていない。

そこで本研究は、アイスシェルターの課題である製氷管理技術を開発することを目的に、以下のような研究を行った。まず、北海道各地の気象要素に対し多変量解析を行い、各地の冷熱量と冷熱資源の利用適地を把握した。次に、実験施設の熱収支を明らかにし、製氷に関する技術的課題を明らかにした。また、3種類の貯氷タンクで製氷実験を行い、各タンクの製氷効率について検討した。最後に、製氷過程をモデル化し、作成したモデルを用いてタンクの大きさと冷熱量(積算寒度)の関係を明らかにし、貯氷タンクの選択基準を提示するとともに、タンクの積み重ねに伴う潜熱の影響について検討した。

1. 北海道における冷熱資源の分布と利用適地の把握

北海道における雪氷・凍土など冷熱資源の利用適地を把握するため、1年を冬期と夏期に分け、冷熱資源とそれに影響を与える気象要素に対して主成分分析を行った。その結果、冬期は2つの主成分、すなわち、寒さと根雪期間の関係を示す第1主成分と、降雪水量と日照時間の関係を示す第2主成分で気象要素の分布が特徴付けられること、また夏期は3つの主成分、すなわち、暑さを示す第1主成分、風速と気温上昇の関係を示す第2主成分、降水量を示す第3主成分で特徴付けられることがわかった。次に、各期で得られた主成分スコアに対してクラスター分析を行い、地域区分を行った結果、冬期は16地域、夏期は19地域に区分できることがわかった。この区分図から、雪の利用は日本海側、氷の利用は内陸部、凍土の利用は道東太平洋側で特に有利であること、また冷熱量分布から、氷はほぼ全域で利用可能であることがわかった。

2. アイスシェルター実験施設の現状と課題

アイスシェルターを導入した実験施設の現状と課題を把握するため、札幌市と稚内市に建設さ

れた施設の熱収支と氷の融解量を観測し、課題を明らかにした。札幌市に建設された実験施設は、過去に数回の改修が行われたにもかかわらず、全ての年で1年を通じて低温環境を維持することができなかった。その原因は冬期に計画量の氷が製造できなかったためであり、この施設の課題は冬期の製氷効率を高めること、すなわち自然冷気を効率よく利用する製氷技術の導入が必要であることがわかった。一方、稚内市の実験施設も氷が夏までに融解し、1年を通して低温環境を維持することができなかったが、この施設は、夏期の自然換気と床からの冷熱損失が大きかった。したがって、アイスシェルターでは、冬期の製氷効率の向上とともに、夏期の冷熱損失の防止も大きな課題であることがわかった。

3. 製氷実験による貯氷タンクの製氷効率の検討

アイスシェルターの製氷効率は、地域の冷熱量と使用する貯氷タンクの材質・形状・大きさに依存する。本研究では、現在使用されている形状・材質・大きさが異なる3つの貯氷タンクを使って製氷実験を行い、その製氷効率(重量効率と比効率)を比較した。実験はタンクを単体で設置した場合と積み重ねた場合の二通りで行った。その結果、タンク単体では、容量が大きいタンクほど重量効率は良いが、比効率が悪いので製氷時間が長くなること、また容量の小さいタンクは、重量効率は悪いが比効率が良いので、製氷時間が短くて済むことがわかった。また、タンクを積み重ねると、下段のタンクから放出される潜熱の影響により、各タンクの製氷効率は単体の場合より低下すること、しかし、積み重ねで容量が増えるため全体の重量効率は良くなることがわかった。以上より、貯氷タンクの選定では、各タンクの製氷効率と製氷時間を考慮して地域の冷熱量(積算寒度)に見合った大きさのタンクを導入すること、またその場合、積み重ねに伴う各タンクの製氷効率低下を考慮して設計することが重要であることがわかった。

4. 製氷効率から見た貯氷タンクの選択基準

貯氷タンクの選択基準を作成するため、タンクの水が凍結する過程をモデル化して検討した。タンク内の水から周辺空気への伝熱量と凍結過程で放出される潜熱量が等しい、という仮定で製氷モデルを作成して計算した結果、製氷が進むにつれて氷の熱抵抗が大きくなるため、60cm以上の深さの水は容易に凍結しないこと、したがって貯氷タンクを選択する場合、タンクの深さが重要であることがわかった。そこで、各地の積算寒度を基に、選択可能な貯氷タンクの最大の深さを検討した結果、深くて大きなタンクでは製氷が困難な地域でも浅いタンクでは可能であり、したがって地域の冷熱量に見合った深さのタンクを導入すれば、北海道のほぼ全域で製氷が可能であることがわかった。

しかし、実際のアイスシェルターでは貯氷室に貯氷タンクを積み重ねて設置するため、貯氷室を含めた詳細な製氷管理技術を開発・確立するためには、貯氷タンク積み重ねに伴う製氷効率低下の把握が重要になる。本研究ではその基礎として、下段タンクからの潜熱放出の影響を組み込んだ製氷モデルを作成した。モデルは、積み重ねた各段のタンクの製氷効率を一定と仮定して作成した。このモデルに、実験で得られた各段の製氷完了時間を入力し、各タンク近傍の気温を推定した結果、推定値の時間変化は実測値とほぼ一致した。これにより本モデルは潜熱の影響を簡易的に表現できることが明らかになった。本モデルはタンクを一列に積み重ねた場合のモデルであるが、これはタンクを複数列に積み重ねた場合の製氷効率を検討するための基本モデルになり得る。本モデルをさらに改良して拡張すれば、貯氷タンクを含めた貯氷室全体の製氷過程の把握が可能になり、製氷管理を含めた貯氷室全体の設計基準の作成が可能になる。

以上のように、本研究は、自然氷の冷熱エネルギーを農産物の低温貯蔵に利用することを目的に、アイスシェルターの製氷管理技術に焦点を当て、貯氷タンクの製氷効率とタンクを選択基準を明らかにしたものである。雪氷冷熱の中で自然氷の利用があまり進んでいない現在、本研究結果は、今後の自然氷の利用とアイスシェルターの普及に貢献するものと思われる。

学位論文審査の要旨

主 査	教 授	浦 野 慎 一
副 査	教 授	平 野 高 司
副 査	准教授	川 村 周 三
副 査	准教授	廣 田 知 良
副 査	助 教	岡 田 啓 嗣

学 位 論 文 題 名

自然氷の冷熱エネルギー利用における 製氷管理技術に関する研究

本論文は7章からなり、図表 79、引用文献 114 を含む 135 頁の和文論文である。他に参考論文 6 編が添えられている。

北海道では現在、地球温暖化防止のための省エネ対策として、雪氷冷熱を有効利用する試みが進められている。その中でも、アイスシェルターと呼ばれる自然氷を利用したシステムは、冬に貯氷タンクの水を凍らせ、その氷を夏に解かすというサイクルを繰り返すことで一年中安定した低温環境の創出が可能になるため、農産物の長期低温貯蔵への利用が期待されている。しかし、現在のアイスシェルターは製氷管理技術が不十分なため、冬期に計画量の氷が得られないという不備が生じている。したがってこのシステムを完成させ、普及させるためには、冬期に効率よく製氷を行うための製氷管理技術の確立、すなわち、地域の冷熱量の把握、冷熱量に適した貯氷タンクの選択、製氷状況の把握などが必要になる。しかしアイスシェルターの製氷管理に関する研究はほとんど行われていない。本論文は、アイスシェルターにおける製氷管理技術の確立を目的に、北海道各地の冷熱量の把握、製氷に関する技術的課題の抽出、貯氷タンクを使った製氷実験、製氷過程のモデル化等を行い、アイスシェルターにおける重要な製氷管理技術のひとつである、貯氷タンクの選択基準を提示したものである。

1. 北海道各地の冷熱量と利用適地の把握

雪氷・凍土など冷熱資源の利用適地を把握するため、気象要素に対する主成分分析と、その主成分スコアに対するクラスター分析を行い、北海道の地域区分を行った。その結果、冬期は 16 地域、夏期は 19 地域に区分できることがわかった。この区分図から、雪の利用

は日本海側、氷の利用は内陸部、凍土の利用は道東太平洋側で特に有利であること、また冷熱量分布から、氷の利用は北海道のほぼ全域で可能であることがわかった。

2. アイスシェルターの現状と課題

アイスシェルターの現状と課題を明らかにするため、札幌市と稚内市の実験施設の熱収支と氷の融解量を観測した。その結果、札幌市の施設は製氷量不足で1年を通じて低温環境を維持することができず、製氷効率向上が課題であることがわかった。また、稚内市の実験施設も氷が夏までに融解し、1年を通して低温環境を維持することができなかったが、この施設は夏期の自然換気と床からの冷熱損失が大きかった。以上から、アイスシェルターの課題は、冬期の製氷効率向上と夏期の冷熱損失防止が課題であることがわかった。

3. 製氷実験による貯氷タンクの製氷効率の検討

製氷効率は地域の冷熱量と貯氷タンクの材質・形状・大きさに依存するため、3つの貯氷タンクを使って製氷実験を行い、その製氷効率(重量効率と比効率)を比較した。タンク単体と積み重ねた場合の二通りで実験した結果、単体では容量が小さいタンクは重量効率は悪いが比効率が良いため、製氷時間が短くて済むことがわかった。また積み重ねると、下段から放出される潜熱の影響で各タンクの製氷効率が低下することがわかった。以上から、製氷効率と製氷時間を考慮して地域の冷熱量(積算寒度)に見合った大きさのタンクを選定すること、またその場合、積み重ねに伴う各タンクの製氷効率低下を考慮して設計することが重要であることがわかった。

4. 製氷効率から見た貯氷タンクの選択基準

貯氷タンクの水が凍結する過程をモデル化し、タンクを選択基準について検討した。その結果、氷の熱抵抗の影響で深さ 60cm 以上のタンクでは水が容易に凍結しないこと、したがってタンク選定では深さが重要であることがわかった。冷熱量(積算寒度)を基にタンクの最大の深さを検討した結果、冷熱が少ない地域でも浅いタンクを使えば製氷が可能であり、したがって地域の冷熱量に適した深さのタンクを導入すれば、北海道のほぼ全域で製氷が可能であることがわかった。また、下段タンクからの潜熱放出の影響を組み込んだ製氷モデルを作成し、実験で得られた各段の製氷完了時間を入力して各タンク近傍の気温を推定した結果、推定値は実測値とほぼ一致した。これにより、本モデルはタンクを積み重ねた場合の製氷効率を検討する基礎モデルになり得ることがわかった。したがって、本モデルを拡張することにより、貯氷タンクを縦横に並べて積み重ねた場合の貯氷室全体の製氷過程の把握が可能になるため、本モデルは貯氷室の設計基準作成のための基礎的ツールになることが示唆された。

以上のように本研究は、アイスシェルターの製氷管理技術に焦点を当て、貯氷タンクの製氷効率とタンクを選択基準を明らかにしたものであり、自然氷の冷熱利用が期待される

現在、その成果は学術上、応用上高く評価される。 よって審査員一同は、木村賢人が博士(農学)の学位を受けるのに十分な資格があると認めた。