

令和 3 年 6 月 14 日現在

機関番号：10105

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2017～2020

課題番号：17K17569

研究課題名（和文）100トン以上の氷から得られる冷熱を利用した省エネ型農産物貯蔵庫の設計指針の作成

研究課題名（英文）Investigation of design guidelines for an energy-saving agricultural storage facility using cold energy from more than 100 tons of ice

研究代表者

木村 賢人 (Kimura, Masato)

帯広畜産大学・畜産学部・准教授

研究者番号：60596675

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,000,000円

研究成果の概要（和文）：本研究対象のアイスシェルター型貯蔵庫は、貯氷室で製造・保管される氷の冷熱によって貯蔵室の温度管理を行う。貯氷室内の氷は、冬期の自然冷気のみで製造される。本研究では、貯氷室内の製氷環境を観測するとともに、製氷完了日を推定できる製氷モデルの作成と検証を行った。観測結果から、製氷中の貯氷室内の気温は、貯氷室内・外の空気の密度差と、製氷によって放出される潜熱の影響により温度分布が形成された。これにより、場所によって製氷状況が異なることが確認された。製氷モデルは、気温と風速の観測値を入力することで製氷完了日を精度良く推定することができた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

氷冷熱利用システムであるアイスシェルターでは、100トン以上の氷を貯氷室で製造する。本研究では、実際の貯氷室内で気温、水温、風速の多点観測を行い、製氷環境を初めて明らかにした。さらに、製氷状況を把握できる数値モデルを作成することができた。アイスシェルターによる農産物の省エネ貯蔵が検討されていることから、本研究はそれに向けた基礎資料として意義があると思われる。

研究成果の概要（英文）：In the Ice-Shelter type of agricultural storage facility, the temperature of the agricultural products storage room is controlled by the cold energy of the ice made and stored in the ice storage room. The ice in the ice storage room is made only by natural cold air in winter. In this study, we observed the ice-making environment in the ice storage room, and developed and validated an ice-making model that can estimate the ice-making completion date. From the observation results, the temperature distribution in the ice storage room during ice-making was formed by the density difference of the air inside and outside the ice storage room and the latent heat released by ice-making. The ice-making model was able to accurately estimate the ice making completion date by inputting the observed values of temperature and wind speed.

研究分野：農業気象学

キーワード：アイスシェルター 氷冷熱利用 製氷環境 自然エネルギー

## 様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

北海道の冬の寒さの象徴的存在である雪氷・凍土は、社会生活の妨げとなる厄介な存在である。しかし、これらは見方を変えると、物や空間を冷やす冷熱源と見なすことができる。したがって、この自然の冷熱源を農産物の貯蔵や建物の冷房などに利用するため、北海道では1980年代頃から様々な方法が考案され、実用化に向けた実証実験が行われてきた。その中で、雪の冷熱利用は東北・北信越地域でも利用可能であることから検討事例が多く、技術開発が進んでいる。その結果、コメ用の貯蔵庫としてすでに実用化されている。

一方、氷の冷熱利用は自然冷気のみで大量の水を製造する必要があるため、利用できる地域は北海道に限定される。ただし、帯広市のような少雪寒冷地域では、雪より氷の冷熱利用の方が適している。氷の冷熱利用方法の一つに、堂腰(1986)によって考案されたアイスシェルター型貯蔵庫がある。この貯蔵庫には、農産物を貯蔵する部屋の隣に氷の製造と保管を行う貯氷室がある(図1)。貯氷室には、建設時に水の入った貯氷タンクが複数個積み重ねられた状態で設置される。なお、水の総量は貯蔵庫の規模にもよるが100トン以上となるのが一般的である。冬期はその水を自然冷気のみで凍らせるため、通気口が開放される。夏期は通気口を閉め、断熱施工される壁・屋根から流入する熱によって氷は徐々に融解する。このように貯氷室内では水の凍結・融解が繰り返されるため、一年を通じて低温環境となる。この空気を隣接する貯蔵室に送風することで、農産物の長期貯蔵に最適な環境を電気をほとんど使用することなく維持することができる。さらに、氷の製造と保管が貯氷室で繰り返し行われるため、水を無駄なく利用できるとともに、冷熱源の搬入などの労力も不要となる。

以上のような特徴と優位性を持つアイスシェルター型貯蔵庫についての取り組みとして、1988年に北海道愛別町に実証実験用貯蔵庫が建設された。しかし、その後目立った取り組みや成果は報告されていない。それが、2000年以降、氷を長期間保管するための断熱構造や、貯氷タンクの形状など検討されるようになった。一方で、実際の貯氷室内での製氷環境については、詳細な検証はされていない。

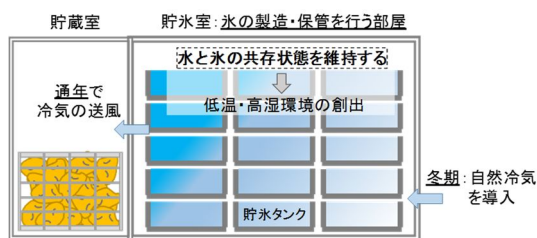


図1. アイスシェルター型貯蔵庫の概略図

### 2. 研究の目的

本研究は、100トン以上の氷を自然冷気のみで製造するための技術の確立を最終目標として、その基礎資料となる貯氷室内の製氷環境の把握と、製氷量を容易に推測できる製氷モデルを開発することを目的とした。

貯氷室における製氷は、冬期に開放される通気口から流入する自然冷気のみで行う。製氷に関する検討事例として、簡易的な施設や低温実験室において検討されたものがある(堂腰と土谷、2000; Kimura et al., 2010)。しかし、実際のアイスシェルター型貯蔵庫において詳細に観測された事例は報告されていない。そこで、帯広市に建設された実証実験用の貯蔵庫の貯氷室において気温、水温、風速の多点観測を行い、製氷環境を明らかにした。さらに、得られた観測結果をもとに製氷量や製氷完了日の推定が可能な製氷モデルを作成した。このモデルにより、簡易的に貯氷室内の製氷状況を把握できると考えられる。

### 3. 研究の方法

#### (1) 貯氷室および観測の概要

帯広市にある実証実験用の貯蔵庫内の貯氷室の床面積は116m<sup>2</sup>ある。ここに縦0.76m、横1.38m、高さ0.22mの大きさのスチール製の貯氷タンクが600個設置されている。貯氷タンクの設置状況については、図2に示すように、150個を一群とするタンク群を形成し、それが4つ設置されている。貯氷タンク群は、縦2列、横7列に並べられ、その上に10~11個を積み重ねたタンクから構成されている。貯氷室内に自然冷気を流入させるため、冬期に通気口が開放される。通気口の開放面積は5.6m<sup>2</sup>であるが、2018年のみ開放面積を2.8m<sup>2</sup>にした。なお、研究対象の貯蔵庫は2012年2月に建設されて以降、貯氷タンク内の水の補充はされていなかった。そのため、目視ではあるが若干の水の減少が確認された。さらに、研究期間中の2018年9月6日に北海道胆振東部地震が発生した。これにより貯氷タンク内の水がこぼれ落ちた。そのため、2019年11月にタンク内に水が補充された。

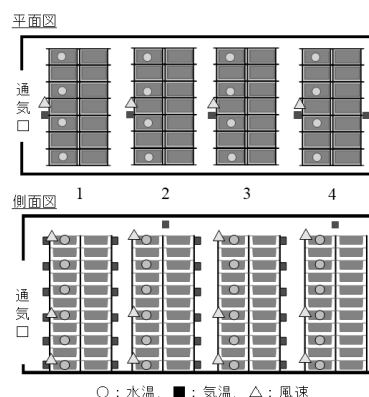


図2. 貯氷室の概要と各観測点の位置。

1~4は貯氷タンク群である

気温と風速の観測は、各貯氷タンク群間の中央部で行った。気温観測は床から 0.2m、0.8m、1.4m、1.9m、2.5m、3.0m の位置に温度計を設置し、合計 30 ヶ所で行った。風速観測は床から 0.2m、1.4m、3.0m の位置に小型風速計を設置し、合計 12 ヶ所で行った。水温観測は、図 2 に示すように、最下段の貯氷タンクから 1 段おきに温度計を設置し、合計 88 個の貯氷タンクで行った。また、貯蔵庫近くの屋外において気温と風速を観測した。観測期間は 2017～2019 年の 12 月 1 日から 3 月 31 日までである。

## (2) 製氷モデルの概要

水の凍結過程は、水温変化から 3 つの段階に分けることができる。第 2 段階は、水温が 0°C で一定で推移し、最も長い時間を要する。したがって、製氷時間はこの段階でほぼ決定される。そこで研究代表者は、この第 2 段階のみを対象にした簡易的な製氷モデルを作成した (Kimura et al., 2005)。このモデルでは、製氷過程の第 2 段階の熱移動の形態を、貯氷タンク内の水から外気への熱移動量と、凍結に伴って放出される潜熱量が等しいと仮定し、以下の式を得た。

$$\frac{dl_s}{dt} = \frac{T_w - T_{out}}{R\rho L} \quad (1)$$

ただし、 $l_s$  は氷厚(m)、 $t$  は時間(s)、 $R$  は熱抵抗( $W^{-1}\cdot m^2\cdot ^\circ C$ )、 $\rho$  は水の密度( $kg\cdot m^{-3}$ )、 $L$  は凍結潜熱( $kJ\cdot kg^{-1}$ )、 $T_w$  は水温( $^\circ C$ )、 $T_{out}$  は気温( $^\circ C$ )である。熱抵抗  $R$  は下式から算出される。

$$R = \frac{1}{h} + \frac{\sum l_s}{\lambda_i} \quad (2)$$

ただし、 $h$  は総括熱伝達率( $W\cdot m^{-2}\cdot ^\circ C^{-1}$ )である。総括熱伝達率  $h$  は文献値(小綿ら、1993)から回帰式を作成し、その式に観測された風速を代入し算出した。なお、貯氷室に設置された貯氷タンクは、側面や底面に比べ、上面からの製氷が優先的に進むことが確認されている(木村ら、2008)。したがって、製氷モデルでは上面のみの氷厚を算出した。

## 4. 研究成果

### (1) 貯氷室内の製氷環境

各年の観測期間中の平均外気温は、2017 年度は  $-4.6^\circ C$ 、2018 年度と 2019 年度は  $-3.5^\circ C$  であった。同期間における帯広市の平年値は  $-4.6^\circ C$  である。したがって、2017 年は平年並み、2018 年と 2019 年は暖冬であった。

図 3、4 は、2019 年度の貯氷室内・外の風速の推移をそれぞれ示したものである。通気口に最も近い場所(図 4-1)は、外の風速の影響を受けることが確認された。一方で、通気口から離れるにつれて外の風速の影響は小さくなり、その風速は通気口の閉鎖時と変わらなかった(図 4-2~4)。この傾向は、2017 年度および通気口の開放面積を減少させた 2018 年度においても同様にみられた。

貯氷室内の冷え込みの状況を明確にするため、観測された気温から積算寒度を算出した。積算寒度とは、 $0^\circ C$  未満の日平均気温を積算した絶対値である。図 5 は、各年の 3 月 31 日時点における積算寒度の分布図である。図に示すように、暖冬となった 2018 年と 2019 年は、平年並みの気温となった 2017 年に比べ冷え込みが弱かった。

また、貯氷室内の気温は一様ではなく、温度分布が形成された(図 5)。この分布は製氷初期から見られた。その要因は、貯氷室内・外の空気密度差と貯氷タンクの設置状況によるものと考えられる。貯氷室内の空気は、外気に比べて相対的に温度が高いため、貯氷室内・外の空気密度差がある。そのため、流入した冷気は下方に滞留し、それによって下方の気温が低くなったと考えられる。さらに、多少の空間があるものの、貯氷室内には貯氷タンクが密に設置された。そのため、風速観測の結果が示すように(図 4)、流入する冷気量は通気口から離れるにつれて減少したと思われる。したがって、製氷は通気口からの距離によって時間差はあるが、下方の貯氷タンクから完了した。この下方の製氷によって放出される潜熱は上昇流となり、上方の気温が低下しにくくなることが知られている(堂腰と土谷、2000; Kimura et al., 2010)。そのため、製氷量が増加する製氷中期になると、貯氷室の下方と上方の温度差がより顕著になった。

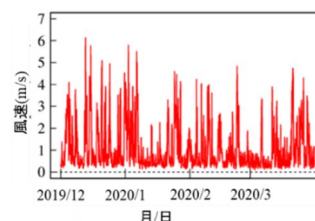


図 3 .2019 年度の外の風速の経時変化

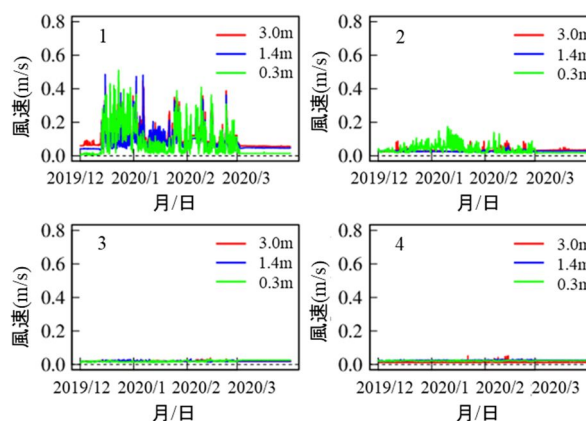


図 4 . 2019 年度の貯氷室内の風速の経時変化。各グラフの左上の数字は、図 2 の貯氷タンク群を示す。

水温観測の結果から製氷が完了したと考えられる貯氷タンク数は、平年並みの気温となった2017年は600個、暖冬であった2018年と2019年はそれぞれ336個と320個であった。

## (2) 製氷モデルによる製氷状況の把握

図6は、製氷モデルから算出された氷厚の推移を各年、各貯氷タンク群ごとにまとめたものである。図内の点線は、貯氷タンクの深さ0.22mを示す。つまり、0.22m以上となった日が製氷完了日となる。推定された製氷完了日は、すべての年で実測に対して遅れる傾向にあった。ただし地震後、水が補充された2019年はその差は10日前後であった。このことから、おおむね精度良く推定できたと考えられる。したがって、氷厚の推移も精度よく推定されていると思われる。これにより、水温観測では把握しにくい氷厚や製氷量の推移も製氷モデルによって容易に推定できることが示された。

一方で、2017年と2018年は一部の貯氷タンクで実測に対して20日以上遅れて製氷完了日が推定された。その理由として、蒸発や地震により水が消失または流出したため、想定された水位0.22mより実際は低くなっていた。これにより、推定された製氷完了日より実測のほうが早く製氷が完了したと考えられる。したがって、製氷モデルは想定された水位においては精度よく製氷完了日を推定でき、さらに貯氷タンク内の水位の状況を検証するのにも有効であることが示された。

以上のように、実際の貯氷室内における詳細な製氷環境について、暖冬や地震による影響とともに詳細に把握することができた。さらに、検証した製氷モデルは製氷量や製氷完了日を推定できるだけでなく、貯氷タンク内の水の減少についても対応できることが示された。なお、研究期間中に製造された氷によって、夏期の農産物貯蔵室は低温環境が維持されたことを確認している。したがって、本研究で得られた知見は、アイスシェルター型貯蔵庫を建設する際の有効な基礎資料であり、今後の氷冷熱利用の普及に大きく貢献することが期待される。

## <参考文献>

- Kimura, M., Urano, S., Ide, K., Okada, K. (2005), Study on utilization of cold energy in natural ice - Modeling of freezing process of water under natural cold air-, Proceedings of the International Conference on Research Highlights and Vanguard Technology on Environmental Engineering in Agricultural Systems, 283-288
- Kimura, M., Urano, S., Okada, K., Saeki, T. (2010), Study on utilization of cold energy from natural ice - Ice-making efficiency of small ice container stacked in a cold room-, Cold Regions Science and Technology, 60(2), 146-153
- 木村賢人・浦野慎一・井手一成・高木千香子・高下翼・岡田啓嗣, 自然氷の冷熱エネルギー利用に関する研究 - 貯氷タンクの製氷過程と製氷効果の評価 -, 北海道自然エネルギー研究, 3, 5-14, 2007
- 小綿寿志, 佐藤義和, 奈良 誠 (1993), アイスポンドによる自然冷熱蓄熱技術の開発 (I) - Twin (温度 - 風速積算値) の導入と製氷制御への利用 -, 農業施設, 24, 21-30
- 堂腰 純 (1986), 自然氷の潜熱エネルギー利用に関する研究 (永久0度C貯蔵庫), 寒地技術シンポジウム, 2, 417-422.
- 堂腰純, 土谷紀明 (2000), 自然氷の潜熱上昇流とその特性(省エネタワーアイスシェルターと換気冷房), 寒地技術シンポジウム, 16, 479-486

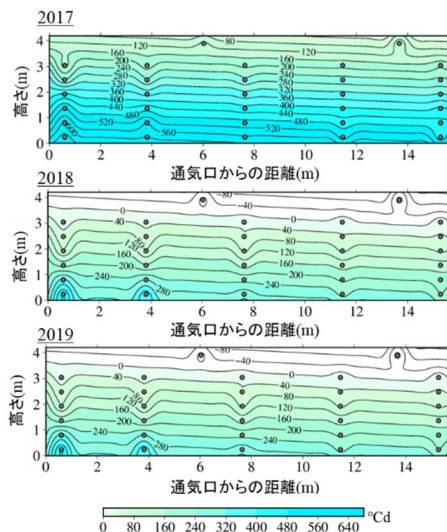


図5. 2017~2019年における3月31日時点の貯氷室内の積算寒度

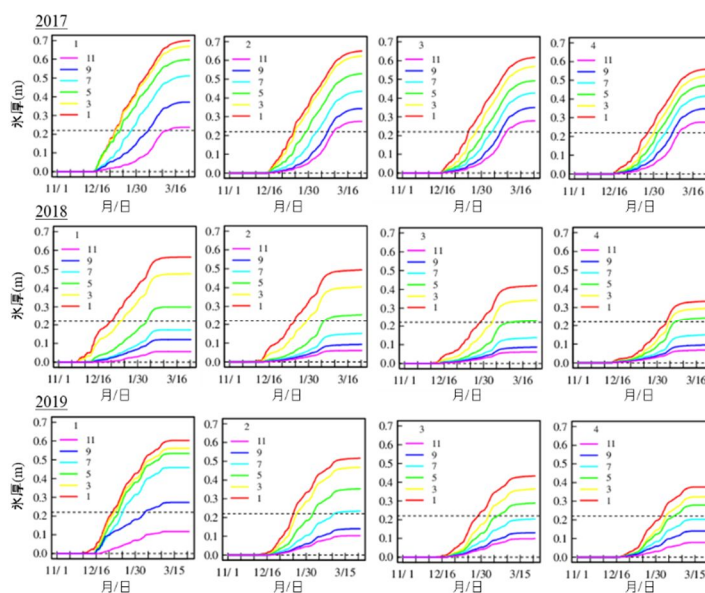


図6. 2017~2019年において製氷モデルによって算出された氷厚の推移。各グラフの左上の数字は、図2の貯氷タンク群を示す。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計4件（うち査読付論文 1件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 木村賢人・伊藤朱里・宗岡寿美・辻修	4. 巻 38
2. 論文標題 アイスシェルター型貯蔵庫における貯氷室の製氷環境の把握と製氷モデルの検証	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 寒地技術論文・報告集	6. 最初と最後の頁 65-70
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 木村賢人・石田 岬・伊藤朱里	4. 巻 15
2. 論文標題 アイスシェルター型貯蔵庫で製造・保管される氷の凍結・融解状況の検証	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 北海道自然エネルギー研究	6. 最初と最後の頁 印刷中
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 木村賢人・本間涼介・小田滉貴	4. 巻 13
2. 論文標題 自然氷を利用した貯蔵庫に関する研究—積み重ねた貯氷タンクの設置位置と製氷効率の関係—	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 北海道自然エネルギー研究	6. 最初と最後の頁 27-36
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 木村賢人	4. 巻 2(14)
2. 論文標題 雪氷冷熱利用の現状とアイスシェルターの優位性	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 アグリバイオ	6. 最初と最後の頁 64-67
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計7件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 木村賢人・石田 岬・伊藤朱里
2. 発表標題 アイスシェルター型貯蔵庫で製造・保管される氷の凍結・融解状況の推定
3. 学会等名 日本農業気象学会2021 年全国大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 木村賢人・本間涼介・小田滉貴
2. 発表標題 アイスシェルター型農産物貯蔵庫の製氷技術に関する研究 - 設置位置の異なる貯氷タンクの熱伝達率の推定 -
3. 学会等名 雪氷研究大会（2019・山形）
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 木村賢人・神谷真優
2. 発表標題 氷冷熱型農産物貯蔵庫に関する研究 - 製氷量の推定モデルの作成と検証 -
3. 学会等名 日本農業気象学会2020年全国大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 木村賢人、本間涼介
2. 発表標題 自然氷の冷熱利用に関する研究 - 小型風速計を用いた貯氷室内の空気の流れの把握 -
3. 学会等名 農業環境工学関連5学会2018年合同大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 本間涼介、木村賢人
2. 発表標題 自然氷の冷熱利用に関する研究 - 貯氷室内の温度分布の推移と製氷に必要な積算寒度の把握 -
3. 学会等名 農業環境工学関連5学会2018年合同大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 本間涼介、木村賢人
2. 発表標題 氷冷熱型貯蔵庫に関する研究 - 貯氷室内に設置された貯氷タンクの設置位置と製氷効率との関係 -
3. 学会等名 日本農業気象学会北海道支部2018年大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 木村賢人、小田滉貴、本間涼介
2. 発表標題 氷冷熱型農産物貯蔵庫で利用される氷の製造環境に関する研究 - 貯氷室内の気温および風速分布の特徴 -
3. 学会等名 日本農業気象学会2018年全国大会
4. 発表年 2018年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8 . 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------