

数値解析による小型予冷施設の評価

森 太郎*1

田中優理香*2

野戸昌弥*2

原田隆之*3

Numerical analysis on small storehouse for precooling by ice storage

Taro MORI Yurika TANAKA Masaya NOTO Takayuki HARADA

The fusibility study of a small pre-cooling facility for agriculture is reported in this paper. In this study, 1) we measured the Q-value of the facility in Kushiro industrial technology center by constant heat supply and 2) also measured the infiltration of that by tracer gas method. 3) We conducted the numerical analysis about 9 cases; the parameters of the analysis are the volume of ventilation and the mass of vegetables.

keywords: ice storage, agricultural facilities, measurement for ventilation, numerical analysis

1. 研究の目的

かつては労働集約型産業の典型例であった農業も就業人口の減少や付加価値の付与のために様々な固定資産が必要となり、人間が必要となくなってきた一方で、石油由来のエネルギーを大量に使用する産業となっている。現在、地球環境問題や原油高が問題となっている。今後、農業の分野においても、競争力や持続可能性を確保するために省エネルギーはますます重要になっていくと考えられる。

その一環として北海道では、雪冰冷熱エネルギーの利用方法が数多く開発され、現在全道において63箇所の施設が設置されている[1]。そのうち1/3強が農業利用であり、例えば、美唄市の雪蔵工房(H12.9竣工)、最近の事例では池田町の小豆氷温ストレージ(H18.12竣工)等が著名であるが、元来は氷室といわれる伝統的な貯蔵技術であり、北海道内全域に分布していた小型の貯蔵庫を現代的にアレンジしたものといえるだろう。これらについては石田ら、荒谷らが詳しい研究を実施している。[2][3]

本研究も上記の雪冰冷熱農業利用の一つであるが予冷装置として使用する点、農協対象の大型の施設ではなく個別の農家を対象とした小型の施設を目指している点に特徴がある。

2. 予冷技術

予冷とは野菜や果物の鮮度を保つために出荷や貯蔵に先立ち3~5に冷却することである。品質

の保持や食品衛生上の観点から生鮮野菜は収穫後速やかに予冷を行い出荷することが望ましく、例えばキャベツの場合には中心温度を 3 ± 2 程度まで冷却することで品質保持効果が得られるとされている。特に北海道では消費地への輸送時間が長いことから予冷を確実にすることが重要であるとされている。

写真2.1に本施設の外觀写真を示す。長手方向に12mある施設で、長手を二等分する場所に断熱壁が設置されており、貯氷庫と予冷库の境界壁となっている。貯氷庫内には49台のタンクが設置され、1



建物データ

名称:氷冷熱エネルギー貯蔵施設

住所:釧路市

断熱データ:()内は厚さ[mm]

外壁:アルミ(1)、発泡ウレタン(98)、アルミ(1)、アルミ(1)、断熱パネル2枚

間仕切り:断熱パネル2枚、石膏ボード(12)、グラスウール(276)、石膏ボード(12)、断熱パネル2枚

断熱パネルの構成はアルミ(1)、発泡ウレタン(48)、アルミ(1)となっている。

写真2.1 施設の概要

*1 釧路高専建築学科

*2 釧路高専専攻科建築・生産システム専攻

*3 釧路工業技術センター

台の体積は225リッターである。従って最大で11トンの氷を作れるようになっている。使用スケジュールは、1～3月に製氷が行われ、その後施設を閉鎖、6～8月に予冷庫としての利用となる。製氷後、3ヶ月程度の時間差があるため、製氷された氷を100%使用できるわけではない。また設備の断熱性能や使用方法によってどの程度の氷を予冷に使用できるかが変わってくる。

さらに、氷は5以上の期間が長く続くと腐敗するため、予冷設備としての使用期間が終了した後、排水を行うのか、または次の製氷期間が終了するまで5を保つことができる量の氷を用意するかで必要な氷の量が変化する。

本報告では、以上の事柄を鑑み、1シーズンの予冷装置の運用状態を確認できる数値解析モデルを作成し、そのモデルを使用して幾つかの数値解析を行った。

3. 減衰法による換気量、熱損失係数の推定

建物の断熱性能を高めていくと建物内外の熱の出入りの多くは換気によって生じる。また、気密性能を高めることは組み立て工程が多い建築物を作る際にはとても困難である。本施設の場合にも組み立てた部材の隙間から、風圧力や内外温度差によるインフィルトレーションが生じていると考えられ、それに起因する熱損失が予冷施設の性能を決める重要なファクターになっていると考えられる。そこで、本施設の数値解析モデルの作成を始めるに当たって二酸化炭素濃度減衰法を用いて換気量を測定した。

3.1 濃度減衰法

濃度減衰法は二酸化炭素を室に供給し、十分に濃度を高くした後供給をやめ、その濃度減衰の様子を一定時間ごとに計測し、以下の式に当ては

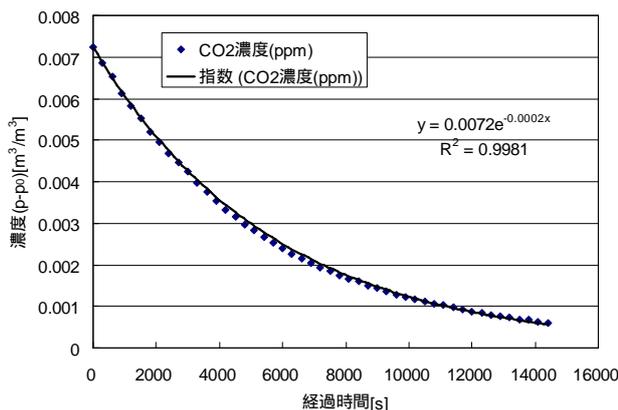


図3.1 二酸化炭素の濃度変動

めることでその期間の平均的な換気量を求める手法である。

現在の二酸化炭素濃度を p としてこの系の微小時間 t 時間内の二酸化炭素に関する物質平衡を考えると、

$$k\Delta t - (p - p_0)Q\Delta t = V\Delta p \quad (3.1)$$

Δt : 時間変化, k : CO_2 発生量, Δp : 濃度変化

Q : 換気量, V : 室容積, p : 室濃度, p_0 : 外気濃度
これを微分方程式化すると

$$V \frac{dp}{dt} = k - (p - p_0)Q \quad (3.2)$$

初期条件 $t=0$ で濃度 p , また、発生量が0として定式化すると

$$p - p_0 = (p_1 - p_0)e^{-\frac{Q}{V}t} \quad (3.3)$$

となる。

以上を踏まえ、2007/12/20-21にかけて実験を行った。先ず、トレーサーガスとして二酸化炭素を放出し12/21の早朝にかけて時々刻々濃度減衰を測定した。その結果が図3.1である。グラフは縦軸に濃度、横軸に時間[s]をとっており、時間が経過するにつれて徐々に濃度が減衰していく様子がわかる。このグラフを最小自乗法を用いて指数近似すると

$$p - p_0 = 0.0072e^{-0.00018t} \quad (3.4)$$

となった。この0.00018という値は式2.3の Q/V を表しており、 $V=54\text{m}^3$ として換気量を推定すると $0.0097\text{m}^3/\text{s}$ である。つまり、約0.65n/h程度の換気量であることがわかる。

3.2 熱損失係数の推定結果

熱損失係数(Q値)は空間の熱性能を表す最も代表的な値である。熱損失係数を得ることが出来れば、空間の内外に温度差が生じた場合のおおよその出入りの熱量を計算することが出来るからである。

測定方法は貯蔵庫内部にヒーターで熱(500W)を供給し、日射のない時間帯の内外温度差を測定することで熱損失係数を測定した。測定ポイントを図3.2に示す。

3.3 測定結果

図3.3は2007/11/18-12/20の一ヶ月間のコンテ

ナ内外の温度の推移である。上側の4本のグラフはヒーターとファンを設置した貯蔵室の上下温度の推移、下側の変動の小さな4本のグラフは貯氷室の上下温度の推移、下側で大きく変動しているのは外気の推移である。どの温度も変動しながら徐々に下がっており、日平均の内外温度差はほぼ一定の値（外気温に対しては24℃、貯氷庫に対しては18℃で標準偏差はそれぞれ1℃以内に収まっている）

以上のデータを元に熱損失係数の推定を試みる。温度のデータは時刻別で見ると熱容量の影響により顕著な時間遅れを見つかることができるが、一日単位ではほぼ定常と考えることができる。した



図 3.2 温度測定ポイント

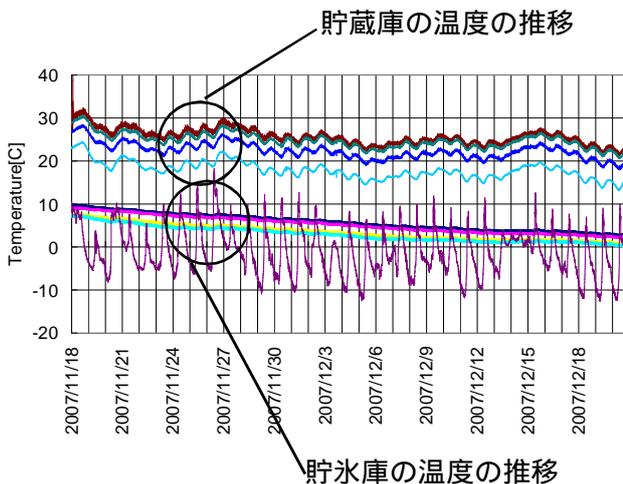


図 3.3 予冷施設の温度の推移

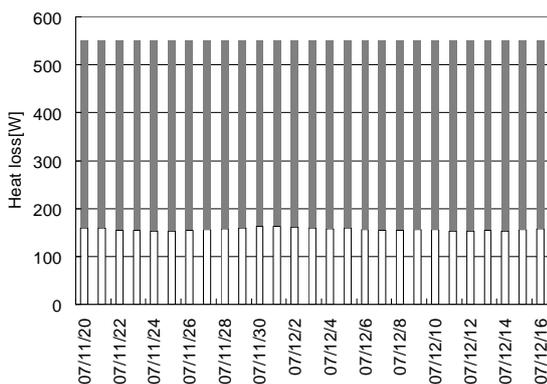


図 3.4 貯蔵庫からの熱損失

がって、内外の温度の日平均値を求め以下のような熱平衡式を作成した。

$$H_G + K(\theta_{out} - \theta_{in}) + c\rho V(\theta_{out} - \theta_{in}) = 0 \quad (3.5)$$

H_G : 室内取得熱 (550W), K : 熱損失係数

$\theta_{out, in}$: 外気温, 室内温度の日平均値

c : 空気の比熱, ρ : 空気の密度, V : 換気量

建物データから熱損失係数 K を求め、 H_G との差し引きから換気による熱損失を求めた結果が図3.4である。グレーの部分が換気による熱損失、白の部分が貫流熱による熱損失で、前者が約7割、後者が3割となっている。またこの空間の熱損失係数 Q 値は約 $1.9\text{W}/\text{m}^2\text{K}$ であり、次世代省エネルギー基準の地域相当の熱損失係数であった。この施設の使用状況を考えると断熱、気密性能ともに強化する余地があると言える。特に気密性能は温度差が大きくなるとより大きな換気量が生じる。その結果氷によって蓄積された冷熱の多くが平常時（使用時以外）の換気によって外部との熱交換によって逃げてしまうため、なんらかの措置が必要と考えられる。

4 数値解析

実際の貯蔵庫をモデルに解析モデルを作成した。壁体については逐次積分法[4]を用いてモデルを作成し、水に関しては有限積分法を用いて離散化を行い、全て陽解法で解を得ている。

図4.1に解析モデルのネットワーク図を示す。解析モデルは三つの壁と二つの空間から構成され、

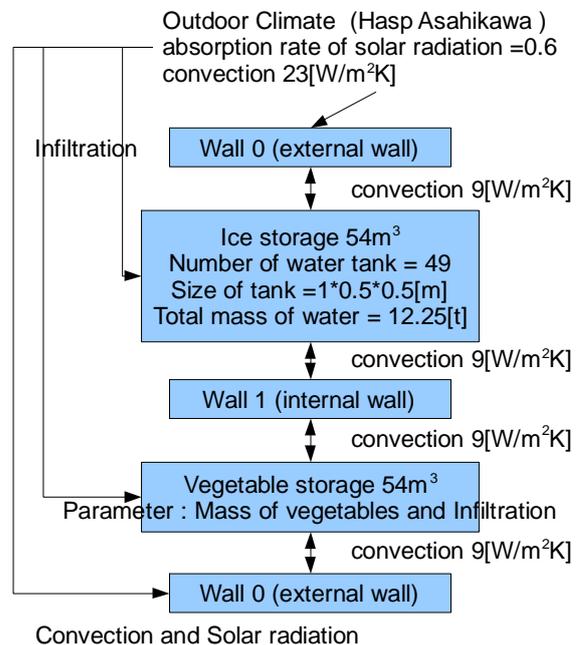


図 4.1 解析モデルのネットワーク図

それぞれの壁の熱貫流率は, Wall 0(外壁)が $0.12\text{W}/\text{m}^2\text{K}$, Wall 1(間仕切壁)も $0.12\text{W}/\text{m}^2\text{K}$ となっている. 二つの空間は片方が貯氷庫, もう一つが野菜の貯蔵庫となっており, それぞれが同じ 54m^3 である.

運用のスケジュールは計算の初日を1/1(助走計算なし)とし, 7日~77日(二ヵ月半)を氷の作成期間として貯氷庫を外気に開放する. その後閉鎖期間としてしばらく閉鎖の後, 189日~245日(7月初旬~9月初旬)を予冷库としての使用期間とした. 使用期間には12~18時の間に1割(乱数により制御)の野菜庫の扉の開放時間があり, それ以外の時間で野菜庫の温度が5以上の時には野菜庫, 貯氷庫間の扉の開放があるとした, また全期間を通してそれぞれの空間の間で一定の換気量(隙間風を模している)があるとした. なお, 換気量は解析パラメーターとしている.

貯氷庫の解析モデルは実物と同じように空間内に 225kg ずつ, 49個の貯氷タンクを設置した. 解析モデルについての詳細は次節で述べる.

貯蔵庫側には野菜のトレーを模して, 半径 0.2m ×長さ 0.3m の円柱状の伝熱モデル(物性値は水と同じ)を設置した. その設置個数については解析パラメーターとしている. 野菜は昼間に収穫し, 夜間予冷库に保管, 翌朝出荷というスケジュールを組み, 18時に22, $10\text{W}/\text{m}^2\text{K}$ で計算を開始し, 翌朝の6時に伝達率を $0\text{W}/\text{m}^2\text{K}$ とすることで出荷後の状況を作成した. この $10\text{W}/\text{m}^2\text{K}$ は空間内の総合熱伝達率(壁)に基づき設定した値であるが, 実際の運用状況ではトレーが重なる等して値が低くなる可能性がある. その場合も予冷库内に持ち込まれる熱エネルギーとしては同一であるが, 翌朝までに温度が下がりきるかどうかという問題が生じる可能性がある. 実際にWEB上で予冷库の情報検索を行うとなんらかの伝達の促進策がとられているようである.

3.1 氷タンクの解析について

水は氷になる過程で複雑な物理現象を生じる, 例えば, よく言われるように密度が4で最大となったり, 伝導率が水に比べ氷の方が約4倍になっている, 一方で密度差による移流によって熱エネルギーが運ばれ上下に温度差を生じる等である. これらの現象をふまえて以下のような伝熱モデルを作成した.

図4.2のようにタンクを上下5段の平板(コントロールボリューム)に分割したうえで温度に見合った比熱 C_{p_i} , 伝導率 λ_i を各コントロールボ

リュームの一次元熱伝導方程式(但し, 伝導率については合成抵抗の値を再計算する)に適用させる. また, コントロールボリュームの温度が 0 以下, 又は以上になった場合にはその温度低下に見合った潜熱を発生させ温度を 0 に維持するとともに発生させた潜熱に見合った量の相変化が生じるようにモデルを作成した. なお, 上部と下部の伝達率に関しては文献[5]を参考にしている.

しかし, このままでは, 移流による上下温度差の影響を評価できないばかりか, 通常, 表面が結水すると熱抵抗を生じ内部に熱が伝わりづらくなる現象とは正反対の現象が起こる. 上記に示したように氷の熱伝導率の方が水の熱伝導率に比べて大きいからである.

そこで引用文献[3]を参考に上下で密度差(上側の層の水のほうが重い)が生じた場合には移流が生じ温度成層がタンク内に生じるようなモデル化を行った. 図4.3は初期温度 10 のタンクを -10 の空間に設置した際の各コントロールボリュームの温度低下(上図)の様子と結氷の様子(下図)である. 各温度が 10 から徐々に下がり18日(432h)で完全に凍っている様子が分かる. また, 各コント

表4.1 壁の断熱性能

| Name | Place | length[m] | Conductivity[W/m/K] | Diffusivity[m ² /s] |
|---------|-------------|-----------|---------------------|--------------------------------|
| wall0,1 | Storage-Out | | | |
| | Component | | | |
| | Urethane | 9.800E-02 | 2.400E-02 | 5.479E-04 |
| | Urethane | 4.800E-02 | 2.400E-02 | 5.479E-04 |
| | Urethane | 4.800E-02 | 2.400E-02 | 5.479E-04 |

| Name | Place | length[m] | Conductivity[W/m/K] | Diffusivity[m ² /s] |
|-------|-----------------|-----------|---------------------|--------------------------------|
| wall2 | Storage-Storage | | | |
| | Component | | | |
| | Urethane | 4.800E-02 | 2.400E-02 | 5.479E-04 |
| | Urethane | 4.800E-02 | 2.400E-02 | 5.479E-04 |
| | Glasswool | 2.740E-01 | 3.600E-02 | 1.338E-03 |
| | Urethane | 4.800E-02 | 2.400E-02 | 5.479E-04 |
| | Urethane | 4.800E-02 | 2.400E-02 | 5.479E-04 |

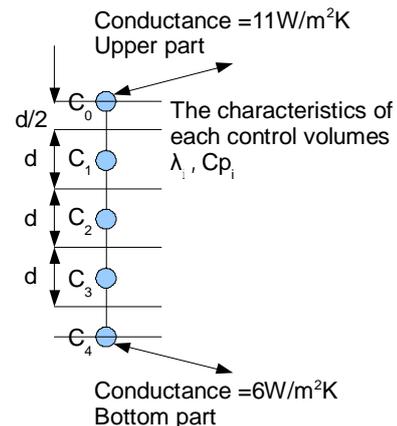


図4.2 氷タンクの解析モデル

ロールボリュームの温度が0 になった後 ,凝固熱が発生するためしばらくの間0 が維持される .その間 ,一旦0 を下回った後 ,温度が再上昇する様子が見られる .これは隣りのコントロールボリュームで発生した凝固熱が流れ込んできているために生じている現象である .氷のほうが熱伝導率が大きいので数値解析上ではこのような現象が発生してしまう .

上右図は左図の初期の部分拡大した図である .初期はC5(最下部)が最も温度が低かったが5 を下回る付近で逆転し最終的には温度分布が逆転しC1 が最も温度が低くなっている .水表面が最も空気にさらされ温度が低くなり ,また密度が小さいため上部に滞留し ,最も早く温度が低くなっていく様子が分かる .その一方で最下部は逆転後C3 ,C4 ,C5 の変動が重なっている .下側から冷やされたことによって密度が軽くなり対流が生じていると考えられる .

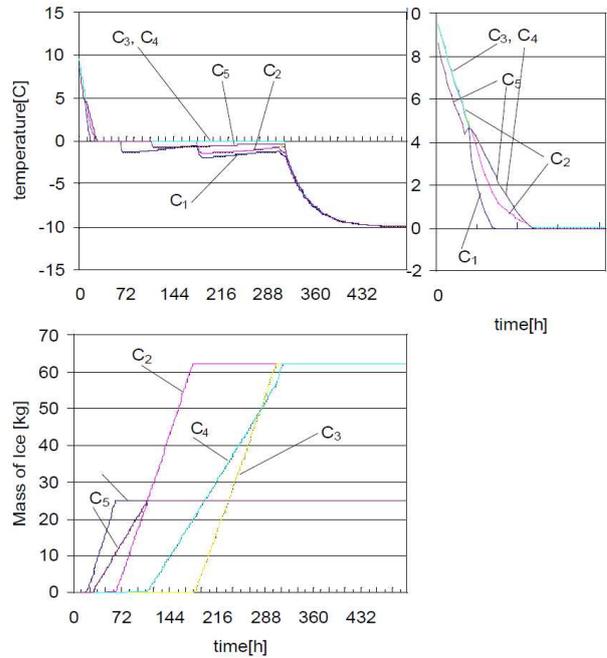


図 4.3 氷タンクの温度低下の様子

表 4.2 計算パラメータ

| | 換気量(風量) | 換気量(換気回数) | 貯蔵量(個数) | 貯蔵量(重量) |
|---------|-------------------|-----------|----------|----------|
| | m ³ /s | n/h | 個 | kg |
| Case 1 | 1.00E-02 | 6.67E-01 | 1.00E+02 | 3.14E+02 |
| Case 2 | 1.00E-02 | 6.67E-01 | 3.00E+02 | 9.42E+02 |
| Case 3 | 1.00E-02 | 6.67E-01 | 5.00E+02 | 1.57E+03 |
| Case 4 | 1.00E-02 | 6.67E-01 | 8.00E+02 | 2.51E+03 |
| Case 5 | 5.00E-03 | 3.33E-01 | 1.00E+02 | 3.14E+02 |
| Case 6 | 5.00E-03 | 3.33E-01 | 3.00E+02 | 9.42E+02 |
| Case 7 | 5.00E-03 | 3.33E-01 | 5.00E+02 | 1.57E+03 |
| Case 8 | 5.00E-03 | 3.33E-01 | 8.00E+02 | 2.51E+03 |
| Case 9 | 1.00E-03 | 6.67E-02 | 1.00E+02 | 3.14E+02 |
| Case 10 | 1.00E-03 | 6.67E-02 | 3.00E+02 | 9.42E+02 |
| Case 11 | 1.00E-03 | 6.67E-02 | 5.00E+02 | 1.57E+03 |
| Case 12 | 1.00E-03 | 6.67E-02 | 8.00E+02 | 2.51E+03 |

4.2 解析結果

表 4.2 は今回実施した計算のパラメータである .換気量(air leakage)に関して三種類 ,貯蔵量に関して三種類の計9 ケースに関して解析を行った .以下 ,図 3.4 , 3.5 は case1 に関する説明である .図 4.4 の上図は1年間の外気温と各室温の変動の様子であり ,縦軸は1ヶ月毎に引いてある .7月上旬からの予冷庫の使用時期に予冷庫の温度が下がり ,一方 ,貯氷庫の温度が扉の開閉 ,野菜の搬入に伴って上昇している様子が分かる .下図は7月上旬に予冷庫の運用をはじめた直後1週間(縦線の間隔が1日である)の温度変動の様子である .18時の野菜搬入後予冷庫 ,貯氷庫の温度は一旦上昇するが24時までには元の温度に回復し ,予冷庫の温度は目標温度である5 に固定されている .

次ページ図 4.6 は氷の重量である .約2ヶ月でタンク内の水は完全に結氷するが ,運用開始前の4月の中旬から換気(隙間風)と壁を通過した貫流熱のため徐々に氷は解けはじめ ,さらに予冷庫としての運用がはじまると急激に溶け ,予冷庫としての使用後(55日間)に氷が残ったケースはなかった .

次ページ図 4.7 は換気量 ,野菜数(予冷庫に搬入される水分の重さ)と予冷庫としての利用期間(氷が全て溶けてしまうまでの日数)との関係である .グラフの横軸は野菜個数を表し縦軸は氷が溶けきった日数を表している .但し ,予冷庫としての使用は190日目(縦軸最下部)からはじめている .換

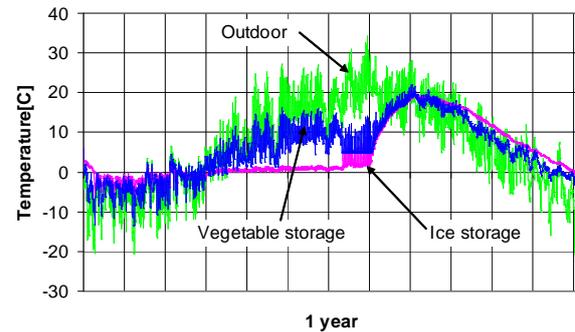


図 4.4 氷タンクの温度低下の様子

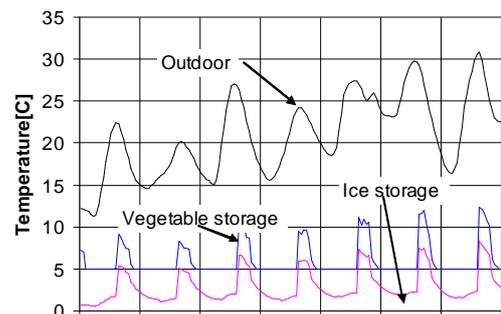


図 4.5 氷タンクの温度低下の様子

気量が多くなるにつれ、また野菜の個数が多くなるにつれ使用期間が短くなっていることが分かる。現在、研究対象としている予冷库ではこれ以上の氷タンクの増量は難しい。したがってこのグラフを用いると使用期間を y 日間とした場合には一日あたり x kgの搬入が可能という搬入可能量を求めることが出来る。また、換気量(隙間風)を $0.005\text{m}^3/\text{s}$ 減らすことで野菜数が少ないときには2週間、多いときにも5日間程度の期間の延長効果がある。但し、元々少ない換気量をさらに改修工事で少なくしていくことは非常に難しい。収納量と気密性能のどちらをとるかはケースバイケースで考える必要があるだろう。

5 まとめ

小型の氷蓄熱設備を利用した予冷設備の実現可能性を探るために、1) 現状の氷蓄熱設備の熱性能、気密性能を調べ、2) そのデータを基に数値解析用のモデルを作成し、3) 計9ケースの数値解析を実施した。

その結果次のようなことがわかった。

- 1) 濃度減衰法による測定により推算された測定期間の隙間風による換気量は約 $9.7 \times 10^{-3}\text{m}^3/\text{s}$ (約 0.65n/h) 程度の換気量である。
- 2) ヒーターによって貯蔵庫の温度を上昇させ熱損失係数を推定した結果 $1.9\text{W}/\text{m}^2\text{K}$ であることがわかった。また、そのうちの70%が換気によるものであり、この設備の性能を上げるためには気密性能の向上が不可欠であることがわかった。
- 3) 実測結果を基にした解析モデルを作成し、数値解析を行った結果、換気量(気密性能)、貯蔵量、使用可能期間の関係を得ることが出来た。

【引用・参考文献】

- [1]NEDO:北海道新エネルギーマップ2008,雪氷熱利用
- [2]石田秀樹他:「道東遠紋地域における丘室貯蔵庫の利用実態調査寒冷気候を恵みとする貯蔵の工夫」,日本建築学会北海道支部研究報告集第77号,2004/7
- [3]大林勇,荒谷登:「氷水槽を利用した高湿度低温低負荷貯蔵庫の試作・実験」,日本建築学会北海道支部研究報告集第70号,1997/3
- [4]荒谷登,鈴木憲三:建築家のための熱環境解析入門,北海道大学図書刊行会
- [5]田中俊六他:最新建築環境工学,井上書院
- [6]水谷幸夫他:コンピュータによる熱移動と流れの数値解析,森北出版

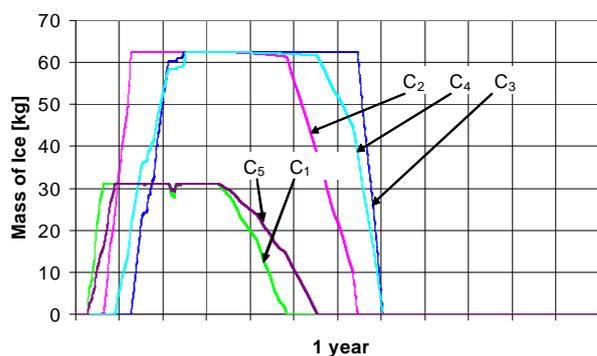


図4.6 氷重量の変化

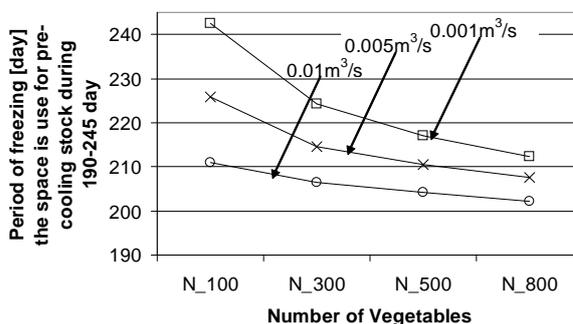


図4.7 各パラメータと利用可能期間の関係