

寒冷外気利用による製氷システム用簡易温度積算器の開発

DEVELOPMENT OF TIME-TEMPERATURE INTEGRATORS FOR ICE MAKING SYSTEM
USING COLD OUTDOOR AIR松田 従三^{*1}
Juzo MATSUDA佐久間 忠秋^{*2}
Tadaaki SAKUMA米沢 智嗣^{*2}
Satoshi YONEZAWA佐藤 雅紀^{*2}
Masanori SATO

Abstract

Two types of time-temperature integrators were developed for ice making systems that use of outdoor cold air in the ice making process. The characteristics of the integrators are as follows.

1. A simple time-temperature integrator called the "Fountain Unit" was used as one of the components of the water discharge apparatus in an ice making system. The Fountain Unit consists of a specially constructed 25L stainless steel water tank, a thermostat, a bottom inflow line and an upper discharge orifice. When the temperature of source water supplied through the bottom of the Fountain Unit is uniform, the Fountain Unit serves to control the volume of water discharged per hour in proportion to the ambient air temperature.
2. When the Fountain Unit is used as a time-temperature integrator and water discharge apparatus, and when the velocity of the outdoor air directed over the ice surface is uniform, the resulting growth of the ice block corresponds closely with the integrated outdoor air temperature.
3. Another simple time-temperature integrator was developed, consisting of a 636mL plastic container holding an antifreeze solution, an electric heater and a thermostat. With this system, the on-off frequency of the thermostat was found to be linearly related to the ambient air temperature.

Key words: time-temperature integrator, ice making, cold outdoor air, layer-by-layer method, winter coldness, Fountain Unit.

1. はじめに

自然の冷熱を利用する方法としては、自然の雪あるいは氷を直接貯蔵する方法と冷気の水、土壌、化学物質などに貯蔵する方法とが考えられる。このうち積極的に冷熱を貯蔵する方法としては、水に冷熱を貯えるすなわち氷を作って貯蔵する方法が、最も一般的なものとして考えられる。

製氷方法としては、コンテナ法と積層法が主として用いられている。コンテナ法の場合は、氷結する面が段々冷却面から離れるため、凍結効率は悪くなる。また水は氷結する場合体積が膨張するために、大きな氷塊を作る場合には堅固なコンテナが必要となる。一方積層法では散水しながら常に冷却面を氷結させるた

めに効率がよく、また薄い氷層を順次氷結させるため膨張量が少なく簡易な容器で間に合うという利点がある。本研究では、大きな氷塊を農業倉庫内で作り、そこに農産物を一緒に貯蔵することを目的としたため、寒冷外気を室外から導入して積層式で製氷することを考えた。

寒冷外気による積層式製氷に関しては、カナダのVigneault⁽¹⁾が -3°C 以下の外気を利用し、導入空気の温度を電氣的に積算する積算器を開発して散水する方式で簡単な製氷実験をしている。また彼⁽²⁾は寒冷外気の農業利用の論文の中でBuies⁽³⁾が当時非常に高価なコンピュータを利用して積算器を開発したことを紹介している。その後Vigneaultはさらに外気導入用ダクトを氷表面に合わせて自動的に上昇させる装置を取り付けた自動製氷システムを完成させ、風量と凍結速度の関係を示すFreezing Indexを求めている⁽⁴⁾。小綿⁽⁵⁾⁽⁶⁾は、水膜の凍結速度と温度風速積算値の関係

原稿受付 平成8年3月18日

*1 北海道大学農学部 (060 札幌市北区9条西9丁目)

*2 ホクレン農業総合研究所 (060 札幌市東区北6条東7丁目)

を求め、コンピュータで製氷制御する方式を開発し、屋外で積層式で製氷するアイスボンド方式を完成させた。

一方筆者らは、より簡単で比較的効率のいい製氷システムを構築するために、散水する水を冷却するとともにその水の温度を測定することで散水のタイミングと量を決定できる簡易な温度積算器兼水排出装置（ファウンテン・ユニット、特許取得）を考案した。この装置を利用して製氷実験⁷⁾を行い、3.7mm厚さの水を自動的に作ることができた。この結果よりファウンテン・ユニットは温度積算器兼水排出装置として十分有効であることがわかった。しかしファウンテン・ユニットでは均一に散水することが難しかったため、凹凸の少ない品質の良い氷を作るためには、ファウンテン・ユニットを温度積算器としてのみ使用し、冷水をノズルで散水する方がよいこともわかった。このため、寒冷外気の温度低下に応じて開閉回数が直線的に増加するファウンテン・ユニットに代わる簡易温度積算器を開発することになり、容器にヒーターと温度計を付けただけの製氷用簡易温度積算器（実用新案登録取得）を考案した。

2. 実験方法

2-1 試作ファウンテン・ユニット

温度積算・水排出装置（ファウンテン・ユニット）の特性を調べるために、図1に示すような装置を試作した。古い冷蔵庫を改造して恒温室を作り、その中に試作ファウンテン・ユニット（塩化ビニール製：直径14.5 cm、長さ67 cm、容積11.4 L）を取り付けた。排出口は内径48 mm、高さ50 mmであり、排出口の水温を測定制御するために、白金抵抗体センサー（直径5 mm）を、感温部を上にして縦向きに排出口内側の水中に固定した。恒温室温度に応じて排出口水温が1.5

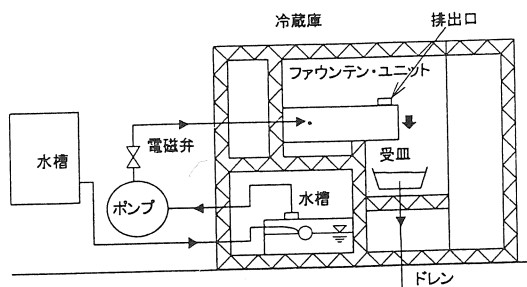


図1 ファウンテン・ユニット実験装置
Fig. 1 Fountain Unit testing apparatus

℃に低下するとバルブが開き、排出口から水が排出され、2.0℃になると停止するよう温度調節器をセットした。水量は0.25 L/minに調節した。恒温室温度、排出口水温、給水温度、給水回数、水排出量を測定して、水排出特性を調べた。

2-2 ファウンテン・ユニット

基礎実験の結果を基に、実用型ファウンテン・ユニットを製作した。図2に示すように長さ幅25 cm、高さ40 cm、容積約25 Lのステンレス製容器であり、上部に水排出口（8 cm×8 cm）、下部に水供給パイプが取り付けられている。排出口の水温は水面下2 mmの位置で、白金抵抗体センサー（直径1 mm）で測定制御した。給水は排出口水温が1.5℃になると始まり、2.0℃になると停止するよう制御した。この装置は、水が泉のように排出されることからファウンテン・ユニットと名づけた。ファウンテン・ユニットを使用して、実用規模の製氷実験を行った。

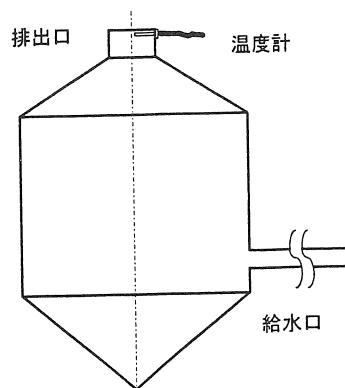


図2 ファウンテン・ユニット
Fig. 2 Fountain Unit

2-3 簡易温度積算器

ファウンテン・ユニットは、温度積算器兼水排出装置であるが、積層式製氷法専用の簡易温度積算器を試作した。図3に示すように内径90 mm、外径100 mm、高さ110 mmの亚克力製円筒容器で容積は約636 mLである。内部に不凍液（30% エチレングリコール液）を入れ、底部から20 mm位置に電気ヒーター（330 Ω）を、上部から5 mm位置に白金抵抗体温度センサー（直径1 mm）を固定した。温度センサーは温度調節器に接続し、設定温度2.0℃、動作隙間0.3℃、0.5℃に設定して実験を行った。この簡易温度積算器を恒温室内で、周囲温度とヒーター電圧（供給電力）を変えて、電磁弁開閉回数を数え、特性を調査した。

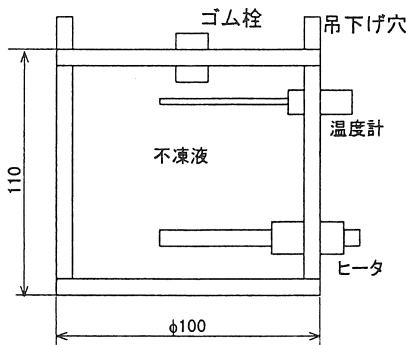


図3 簡易温度積算器

Fig. 3 A simple time-temperature integrator

3. 結果および考察

積層式製氷における散水量(製氷速度)と製氷面への風量との関係を、Vigneault⁽⁴⁾はFreezing Indexとして求めており、これは一定風量のもとで単位厚さ(mm)の水層を凍結させるのに必要冷熱量($^{\circ}\text{C} \cdot \text{min}$)を零下温度($^{\circ}\text{C}$)と時間(分)の積で表わしたものである。したがって積層式製氷では、風量が一定であれば寒冷温度の低下に比例して散水量を増加すれば、一定のFreezing Indexで凍結できることになる。

3-1 試作ファウンテン・ユニットの特性

図4に周囲温度と水排出回数の関係を示している。図から明らかなように給水温度が異なっても、周囲温度の低下に比例して排出回数は増加している。周囲温

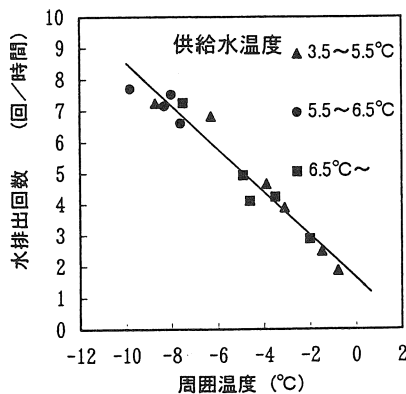


図4 周囲温度と水排出回数

Fig. 4. Relationship between discharge frequency and ambient temperature.

度と排出回数の関係は、 $R^2=0.95$ で直線に回帰できる。したがって前述のようにこの温度積算・水排出装置によって、一定のFreezing Indexで積層式製氷が行えるものと考えられた。また時間当たりの水排出量は、給水温度が一定であれば、ほぼ周囲温度の低下に伴って直線的に増加し、次式で表わされることを知った。

$$Y = -A(X - 1.5)$$

X: 周囲温度 [$^{\circ}\text{C}$]

Y: 1時間当たりの水排出量 [$\text{g} \cdot \text{h}^{-1}$]

A: 定数 [$\text{g} \cdot \text{h}^{-1} \cdot ^{\circ}\text{C}^{-1}$]

3-2 ファウンテン・ユニットによる製氷

試作ファウンテン・ユニットは給水温度が一定であれば周囲温度の低下に比例して水排出量を増加するという結果に基づき、図2に示す実用型ファウンテン・ユニットを製作して製氷実験を行った。実用製氷システムでは、給水温度を一定にするために、約2 m³の水槽に水を一旦溜め、温度を安定させてからファウンテン・ユニットに給水するようにした。したがってファウンテン・ユニットは、試作ファウンテン・ユニットと同じ機構を持ち、同じ温度で制御されるため、外部から導入された冷却空気温度低下に比例して、散水量を増加させることができる。

本製氷実験では、散水量および風量の決定にあたってはVigneault⁽⁴⁾のFreezing Index $150^{\circ}\text{C} \cdot \text{min} \cdot \text{mm}^{-1}$ を採用した。このFreezing Index $150^{\circ}\text{C} \cdot \text{min} \cdot \text{mm}^{-1}$ は、 -10°C の空気が15分間、氷面に $60 \text{ L} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$ の風量で運ばれた時に得られ、風量に対する凍結効率が高くなっている⁽⁴⁾。製氷実験では、この風量の寒冷外気を屋外から倉庫内の製氷槽へ導入し、周囲温度に応じた散水量になるようにファウンテン・ユニットの水排

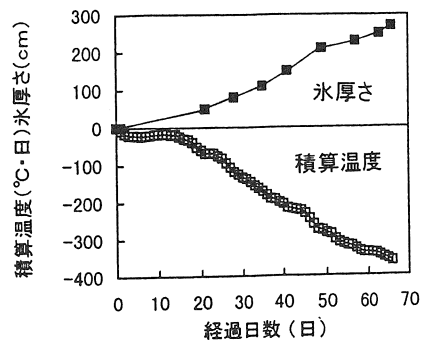


図5 氷厚さと積算温度

Fig. 5 Change in ice thickness and integrated temperature

出量を、ファウンテン・ユニットの排出回数を測定して供給水量で調整した。

製氷実験結果と周囲積算温度の1例を図5に示す。

積算温度(x)と氷厚さ(y)との関係は一次式($y = 0.74x - 0.49$, $R^2 = 0.99$)で表わされ、積算温度の変化と同じ傾向で氷厚さは成長していくことがわかる。これらの結果よりファウンテン・ユニットは温度積算器兼水排出装置として十分有効であり、寒冷外気の低下に比例して反応回数が増加する温度積算器は、積層式製氷に有効であることがわかった。しかしファウンテン・ユニットでは上部の排出口から冷却水が吐出され、主としてファウンテン・ユニットの真下に落ちるため、冷却水を氷面に均一に散水することが難しい。したがって、凹凸の少ない品質の良い氷を作るためには、ファウンテン・ユニットを温度積算器としてのみ使用し、ノズルで散水する方がよいこともわかった。

3-3 簡易温度積算器の特性

製氷実験の結果、ファウンテン・ユニットを単に温度積算器として用いるならば、より簡単なものの方がよいと考えられた。前述のように積層式製氷用の温度積算器としては、周囲温度の低下に比例して、電磁弁開閉回数など出力回数が直線的に増加することが必要である。その結果、図3に示すようなヒータで容器中の不凍液を暖め、設定温度に達するとヒータを切り、周囲温度で低下すると再び通電するという単なる熱容量の大きい温度調節器を簡易温度積算器として試作し、その特性を恒温室内で調査した。

この方式では動作隙間が一定であれば、電磁弁開閉の1サイクル間に積算器に供給される熱量あるいは積

算器から奪われる熱量は等しく、しかも一定である。したがって次式が成り立つ。

$$Q \cdot n = A \cdot h \cdot \Delta t$$

ここで Q : 1 回に供給される熱量 (kJ/回)

A : 積算器の表面積 (m^2)

h : 伝熱係数 ($kJ/m^2 \cdot K \cdot h$)

Δt : 周囲温度と積算器の温度差 (K)

n : 回数 (回/h)

図6に温度調節器を設定温度2℃、動作隙間0.5℃に設定した場合の周囲温度と電磁弁開閉回数の関係を示している。前式で示すように供給熱量が変わっても、周囲温度(t)と開閉回数(N)の関係は $N = -1.9t + 5.8$ に回帰でき、 $R^2 = 0.94$ の直線関係にあることがわかる。周囲温度が一定の場合、低供給電力の時にはヒータへの通電時間が長くなり、高電力では通電時間が短くなって、1回あたりの供給熱量は一定になる。開閉回数は、周囲温度が低くなるにしたがって直線的に増加する。これは周囲温度に対して、供給電力が十分な容量がある間は通電時間は短い、冷却時間は周囲温度の低下とともに短くなるために、開閉回数は増加することを示している。しかし、図6、7に示すように周囲温度が更に低下して冷却速度が速くなると、供給電力一定の場合、開閉回数は増加してある温度でピークを示し、さらに周囲温度が低下すると通電時間は徐々に長くなるため、左下がりの直線が示すように開閉回数は徐々に減少する。最後にある温度で通電は連続的になり、回数は0となる。図6、7から得た開閉回数と周囲温度との回帰式は、回数の減少が明らかになかったもののデータは含んでいない。

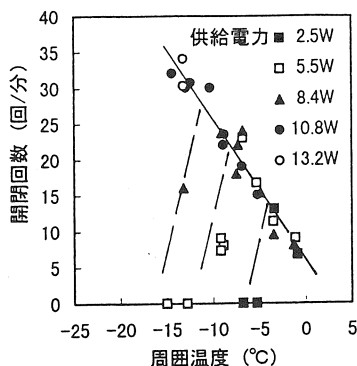


図6 簡易温度積算器開閉回数(動作隙間0.5℃)

Fig. 6 On-off frequency of a simple time-temperature integrator ($\Delta t = 0.5^\circ C$)

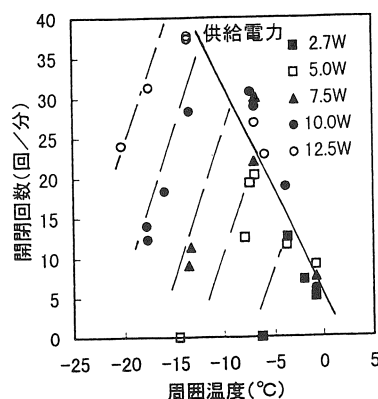


図7 簡易温度積算器開閉回数(動作隙間0.3℃)

Fig. 7 On-off frequency of a simple time-temperature integrator ($\Delta t = 0.3^\circ C$)

図7は、設定温度 2.0 °C、動作隙間 0.3 °C の場合を示している。周囲温度(t)と開閉回数(N)の関係は $N = -2.6t + 5.7$ 、 $R^2 = 0.84$ であった。図6、7より、動作隙間が大きいと、開閉回数は減り、傾きはなだらかになるが、逆に動作隙間が小さいと回数は多くなり傾きは急になることがわかる。このように簡易温度積算器は、ファウンテン・ユニットの排出回数と同じように周囲温度に比例して開閉回数を変えることから、積層式製氷システムの温度積算器として十分有効であると判断できる。

この温度積算器の能力は、容器の大きさと供給電力量によって決まり、本積算器では 15 W でほぼ -15°C まで対応できる。実際の使用にあたっては、動作隙間を変えて予め、周囲温度、風速と回数との関係を調べておく必要があり、ファウンテン・ユニットと同程度の開閉回数にする場合は、本器では動作隙間を 1 °C にしなければならない。このように本方式は予備実験は必要であるが、この積算器、ノズルと製氷槽の組み合わせによって簡単に積層式製氷が可能となる。

4. 結 論

寒冷外気を利用して積層式で製氷するための簡易温度積算器を開発した。この積算器、ノズルと製氷槽の組み合わせによって簡単に積層式製氷が可能となる。積算器の特性は次の通りである。

1. 簡易温度積算器兼水排出装置としてファウンテン・ユニットを制作した。この装置は、周囲温度の低下に比例して散水量を調節することができた。
2. ファウンテン・ユニットを使って製氷試験を行った結果、温度積算器および水排出装置として正常に働き、積算周囲温度に比例して氷を成長させることができた。
3. ヒーター、温度調節器と不凍液の封入した容器から成る簡易温度積算器を開発した。これは周囲温度の低下に比例して電磁弁開閉回数を増加することから、製氷用温度積算器として有効であると判断された。

参考文献

- (1) Vigneault, C., G. ST. Amour, and D. J. Buckley, Use of a Temperature Integrator to control Ice Making using Cold Outside Air. Engineering and Statistical Research Center, Agricultural Canada, Ottawa, Ontario, Report No.1-901, (1987) p6
- (2) Vigneault, C., Ice Storage of Winter Coldness for Agricultural Applications. ASAE paper No.83-6547 (1983) p14
- (3) Buies, S., Climatisation d'immeuble au moyen de glace naturelle entreposee. Rapport final d'un contrat avec Travaux Publics Canada, Technologie de l'energie. MAT-83-023, (1982) 197
- (4) Vigneault, C., Lemieux, M. L., Masse, D. I., Development of an Automated Ice-block-making System Utilizing Winter Outdoor Air. Canadian Agr. Eng. 30(1) (1987) 77 - 82
- (5) 小綿 寿志、佐藤 義和、奈良 誠、アイスボンドによる自然冷熱蓄熱技術の開発 (I) 農業施設 24 巻 1 号 (1993) 21-30
- (6) 小綿 寿志、佐藤 義和、アイスボンドによる自然冷熱蓄熱技術の開発 (II) 農業施設 24 巻 3 号 (1993) 133-141
- (7) Juzo Matsuda, Tadaaki Sakuma, Satoshi Yonezawa, Masanori Sato, Development of an automated ice making system using low outdoor air temperature conditions and the subsequent vegetable storage, Journal of the society of agricultural structures, Japan, 26(3) (1995) 21-30
- (1) Vigneault, C., G. ST. Amour, and D. J. Buckley, Use of a Temperature Integrator to control Ice Making using Cold Outside Air. Engineering and Statistical Research Center, Agricultural Canada,