

論文

放射冷却による製氷過程の観察

上村 靖司¹⁾, 星野 真吾²⁾

要旨

一般に氷を製造する場合の熱移動は、熱伝導または対流熱伝達が支配的であり、放射を工業上利用した製氷技術は見当たらず、その得失は未知である。本研究は、放射冷却による製氷（放射製氷）の技術開発を目的とし、実証実験装置を試作しその製氷過程の観察を行った。実験装置は低温熱源と断熱水槽で構成され、両者の間の熱伝導と対流熱伝達を排除し、かつ霜の成長を抑制するための真空層を挿入した。実験は露点温度約2°Cに保持された低温室内で行い、水槽側面の静止画像撮影と水温測定を行った。初晶は冷却開始から数時間後に水槽上面で自然発生し、その後鉛直下向きにはほぼ一定速度で成長し、40時間で約20mmの厚さとなった。その間の成長速度は0.6mm h⁻¹であった。生成された氷は目視では完全に透明で気泡も見られなかった。そして結晶は全体が鉛直方向をc軸とする単結晶であった。熱伝導による製氷（伝導製氷）と比較を行った結果、伝導製氷は氷が厚くなると成長速度が低下するのに対し、放射製氷では速度低下が見られず、また取り込まれる気泡のサイズが小さいという違いが見られた。

キーワード：放射冷却、製氷、単結晶

Key words: radiation cooling, ice growth, single crystal

1. はじめに

現在の工業製氷は、結氷缶（アイスカン）製法とつらら製法（ターボ製法）の2種に大別される。結氷缶製法は、所定の前処理を施した原料水を入れたアイスカンをブライン（-10°C程度に冷却された不凍液）槽に浸し、エアレーション（aeration, 強制通気）を行いながら24から48時間かけて氷塊を生成する。つらら製法では、内部にブラインまたは低温液体を通した金属板の表面に原料水を流して、金属板表面に氷を生成する。

工業製氷においては、透明度が高く不純物・気泡の少ない価値の高い氷を製造するために、生成原料水の前処理、冷却速度の制御、凍結順序のコントロール（表面からではなく側壁から中央に向かって）、エアレーションによる不純物・溶存空

気除去、さらに残存水の廃棄・入れ替えなどが行われる。

製氷とは、液体水から熱を奪い固体水に相変態させることである。従って液体水から熱を奪う伝熱過程に他ならない。伝熱の形態には伝導、対流、放射（ふく射）の3つがある。上述の工業製氷では、その熱移動形態は熱伝導が支配的である。対流冷却が支配する製氷の代表は自然界のつららであり、放射冷却が支配的なのは天気が良く寒い日に起こる路面凍結である。

本論文では、工業製氷に利用した例の見あたらない放射による製氷の試みについて述べる。実証実験装置の製作、そしてその製氷過程の観察結果について報告する。

2. 放射製氷の原理

製氷のための熱移動を、放射が支配的になるようにするには、伝導と対流熱伝達による熱移動を除かなくてはならない。すなわち、冷熱源と水と

1) 長岡技術科学大学機械系

〒940-2188 長岡市上富岡町1603-1

2) 長岡技術科学大学大学院工学研究科

〒940-2188 長岡市上富岡町1603-1

を非接触にしなくてはならない。氷点下数十度に冷えた板（受熱板と呼ぶ）と水を対向して離して配置した場合、受熱板と水の間に空間に空気が流通すると、空気による対流と伝導が起こるだけでなく、乾燥空気でない限り受熱板上に霜が形成され成長する。霜が形成されると、水を凍結させるだけの放射冷却はできなくなる。

そこで、図1に示すように、中間に真空層を挿入する手法を考案した。そうすると放射は電磁波であるため真空中を伝播できるが、媒体を必要とする熱伝導や対流熱伝達は防ぐことができる。さらに霜の元となる水蒸気の供給も排除される。

3. 放射冷却による製氷実験

3.1 実験装置

装置の概要を図2に示す。発泡ポリスチレンのベースの上に、2mm厚の透明アクリル板で組んだ水槽（50×50×100mm）を置き、その周囲を発泡ポリスチレンで囲う。水槽上部には、冷却ユニットを載せるためのフランジが取り付けられ、中央の水槽上面は開放されている。その上に、4mm厚の透明アクリル板で組み立てられた真空層と、冷却ユニットが積み上げられている。冷却ユニットは、ペルチェ素子（最大電圧15V、最大電流6A）、放熱フィン、空冷ファンで構成される。真空層の内寸は92×92×22mmで、側面には真空ポンプにつながるニップルが取り付けられる。

氷の成長を観測するため、側面4面のうちの2面の発泡ポリスチレンを取り除き、側方に照明用白色LEDとCCDカメラ（320×240 pixel）を置いた。水槽内には液面から20mmと80mmの位置に熱電対（ $\phi 0.32\text{ mm}$ ）を設置した。また、氷の生成に伴う体積膨張を緩和するための、リザーバタンクへの接続口（ $\phi 10\text{ mm}$ ）を水槽下部に設けた。図3に装置全体の様子を示す。

3.2 実験方法

まず、真空ポンプ（最大真空度30 torr）で10分間以上減圧してからバルブを閉じた真空層と、冷却ユニットを、水槽の上に設置する。次に、真空層と水との間の空気が抜けるまで、リザーバタンクに原料となる水を注ぐ。本研究では未処理の水道水を用いている。

温度は、霧囲気（装置周囲の代表点温度）、ペル

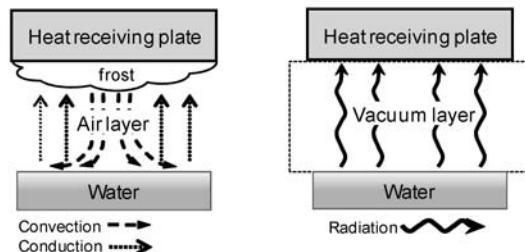


図1 放射冷却による製氷の原理。

Fig. 1 Principle of radiation cooling.

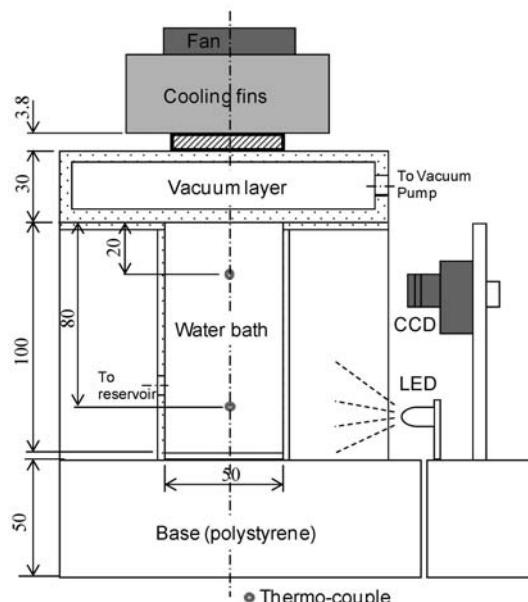


図2 実験装置（製氷部）。

Fig. 2 Experimental setup.

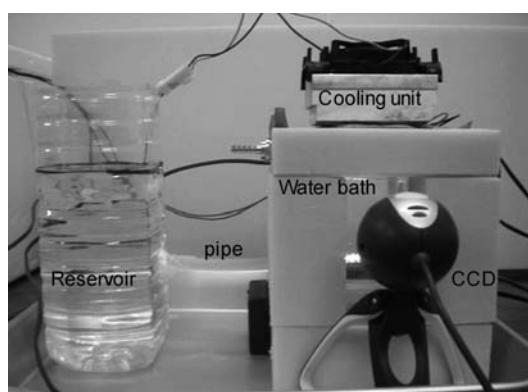


図3 実験装置（全体）。

Fig. 3 View of experimental setup.

チエ素子下面、水槽内2カ所(水面から20mmと80mm)の計4カ所で、1分間隔で測定する。氷の成長過程は水槽側面から5分間隔で撮影する静止画から読み取る。

所定の大きさの氷が生成されたら、冷却ユニットを外して氷を取り出す。まず肉眼で透明度を確認する。次にその氷を薄片(厚さ1mm以下)にし、交差偏光板に挟んで結晶構造を確認する。

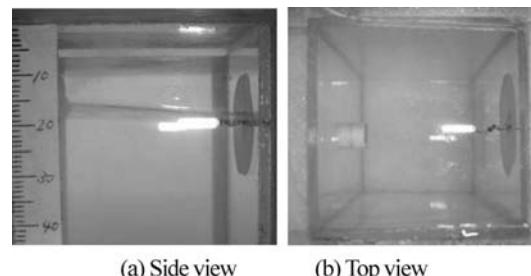
最後に、エッチピット法(氷薄片に塗布したフォルムバール溶液の蒸発に伴ってできるピット形状から結晶方位を読み取る手法)によって、結晶方位を観察する。

3.3 実験結果

雰囲気温度を2°Cに設定した低温室内において、ペルチエ素子に12Vの電圧を連続的に印加して、氷の生成過程を観察した。このとき、受熱面の温度は-37°Cであった。氷は、冷却開始から約3時間後に水槽上部の真空層底面に沿ってまず水平方向に生成し、その後鉛直下向きに成長し、40時間後に20mmの厚さとなった(中央部で測定)。図4に示すように側面から見ても、上面から見ても、生成された氷は完全に透明で、目視では気泡は見られなかった。

図5(a)に、撮影画像から読み取った氷の厚さを示す。冷却開始から3時間までは0であるが、その後8時間頃まで急激に成長し、そのあとはほぼ一定の割合で成長している。図中の近似線の傾き、すなわち成長速度は平均で0.6mm h⁻¹であり、生成された氷の厚さが厚くなても目立って低下しなかった。図5(b)に雰囲気温度と、水槽内代表点(水槽上面から20mm深さ)温度を示す。低温室は+2°Cに設定されており、実験装置周囲の雰囲気温度は+2.1±0.3°Cの範囲で変動していた。さらに、数時間おきに冷凍機が霜取り運転をするときには4°Cを超えている。水面から20mmの位置の温度が3時間後に一時下がって再び上がっているのは、氷生成が目視で観察された時間と一致し、過冷却から初晶が発生した結果と考えられる。氷の成長面と温度測定点の距離が8mm以下になると水温は1°C以下に下がった。

生成された氷塊から水平方向の薄片を切り出し、交差偏光法によって氷結晶構造を調べたところ、図6(a)に示すように50×50mm断面の全体



(a) Side view (b) Top view

図4 製造された氷の外観。

Fig. 4 Formed ice for 40 hours.

が1つの結晶で構成されていた。エッチピット法によって結晶方位を測定したところ、ピット形状は図6(b)に示すように六角形であり、c軸は鉛直方向であった。

4. 冷却方法の影響と伝導製氷との比較

4.1 実験方法

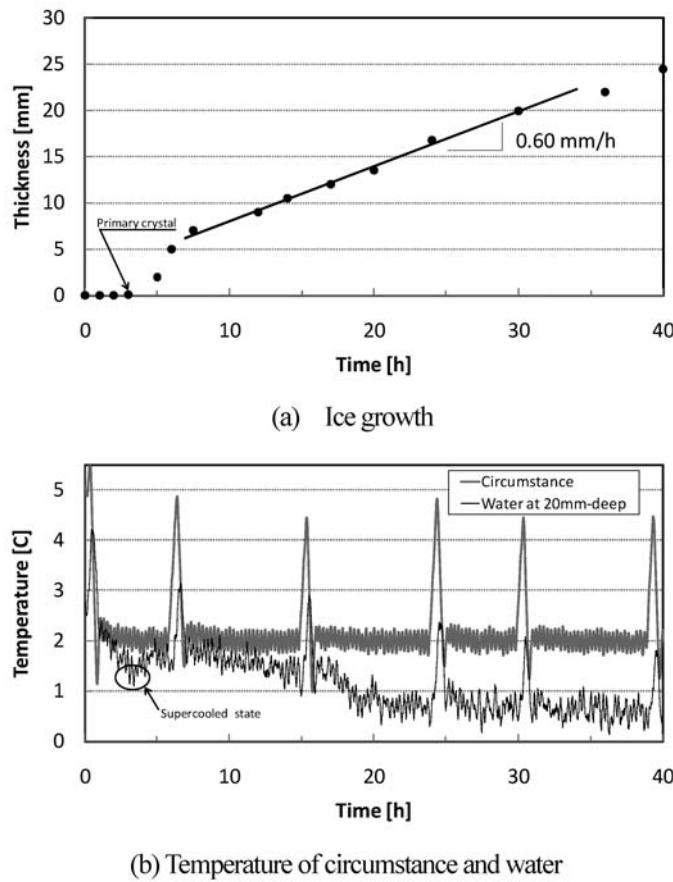
上で述べたとおり、放射冷却によって製氷は可能であり、容器サイズの単一の結晶が製造できることが示されたことから、冷却方法を変えて同様の製氷実験を行った。

冷熱源として、ペルチエ素子に加えてドライアイス(昇華温度-78.5°C)も用意した。また受熱板と水面の間の真空層を3mm厚さのアクリル板に置き換えて、熱伝導によって冷却する場合も実験した。このとき、ペルチエ素子の印加電圧を制御し、受熱面温度を-3.5°C(Exp5), -7.5°C(Exp6), -37°C(Exp7)の3通りに変えて行った。

ドライアイスは、箱形の冷却ユニットを作製し、これに詰めることで冷却した。受熱部には厚さ10mmの銅を用い、受熱面積はペルチエ素子と同じ40×40mmとし、2mm高さの突起を持たせた。また、側方からの熱流入の影響を見るために、撮影のために開放されている2つの側面を3mmのアクリル板でカバーをして空気層(厚さ40mm)をつくり断熱性を高めた場合についても実験した(表1(c)においてopenまたはcoveredと表記した)。雰囲気温度は原則として2°Cに設定した。

4.2 実験結果

図7に各実験における氷の成長を示す。また表1に実験条件および、結晶観察、目視観察の結果を示す。なお、放射製氷と伝導製氷を比較するため、こ



(b) Temperature of circumstance and water

図 5 水の成長と雰囲気温度、水槽内水温。

Fig. 5 Ice growth and temperature.

この平均成長速度は各実験で氷厚さが 20 mm に達した時間から計算して求める。

ペルチェ素子による放射冷却である Exp1 と Exp2 を比較すると、断熱の効果で成長速度の向上は見られるが、Exp2 では複数の結晶で構成される多結晶体となった。

ドライアイスを用いた Exp3 では、 4 mm h^{-1} と大きな成長速度となり、結晶観察では亜粒界を含む不完全な結晶体が見られた。また氷全体に気泡の取り込みが見られた。Exp4 は、雰囲気温度を 5°C に設定し、側方からの熱流入量を Exp1 と同等にしたものであり、この場合、Exp1 と同様に単結晶となった。

真空層をアクリル板に置き換えて、熱伝導で製氷した Exp5 と Exp6 では、受熱板表面温度は $-3.5 \sim -7.5^\circ\text{C}$ と、放射製氷の時よりも高い温度で

あったが、直接接触であるため大きな成長速度となった。成長速度が 1.7 mm h^{-1} であった Exp5 では、比較的大きな結晶が形成されたが、 5.1 mm h^{-1} であった Exp6 では、小さな結晶粒で構成されていた。Exp7 では、ドライアイスを使った Exp3 と近い成長速度を示し、小さい結晶粒で構成されていた。

水中に補足される気泡について、側方からの写真と、写真から読み取った気泡の状態（筋状、ランダム）と直径を表 1 に示す。成長速度の近い Exp3 と Exp6 を比較すると明らかであるように、放射製氷の場合、伝導製氷の場合よりも小さな気泡が筋状に形成されるという特徴が見られた。

放射冷却と熱伝導冷却の最大の違いは、成長速度、すなわち成長曲線の傾きの変化である。熱伝導の場合には、氷厚さが厚くなると成長速度が明

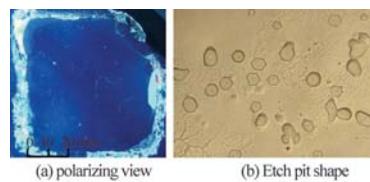


図 6 結晶構造.

Fig. 6 crystal structure.

表 1 実験条件と実験結果.

Table 1 Experimental result according to cooling conditions.

	Radiation (vacuum contact layer)			
	Exp1	Exp2	Exp3	Exp4
a) Temp. [°C]	-37 (Peltier)	-37 (Peltier)	-65 (Dry ice)	-37 (Peltier)
b) Growth rate [mm/h]	0.60	0.90	4.9	0.66
c) Insulation	Open	Covered	Covered	Covered
d) Horizontal cross-section (Crystal)				
e) Bubble form, size	None, N/A	Linear streak, < 0.5 mm	Linear streak, < 0.5 mm	None, N/A
f) Side view (Bubble)				
	Conduction (acrylic contact layer)			
	-	Exp5	Exp6	Exp7
a) Temp. [°C]	-	-3.5 (Peltier)	-7.5 (Peltier)	-37 (Peltier)
b) Growth rate [mm/h]	-	1.7	5.1	14
c) Insulation	-	Covered	Covered	Covered
d) Horizontal cross-section (Polarizing view)	-			
e) Bubble form, size	-	Random, < 2.0 mm	Random, < 3.0 mm	Linear streak, < 1.0 mm
f) Side view	-			

※Yellow arrows show liquid/solid border.

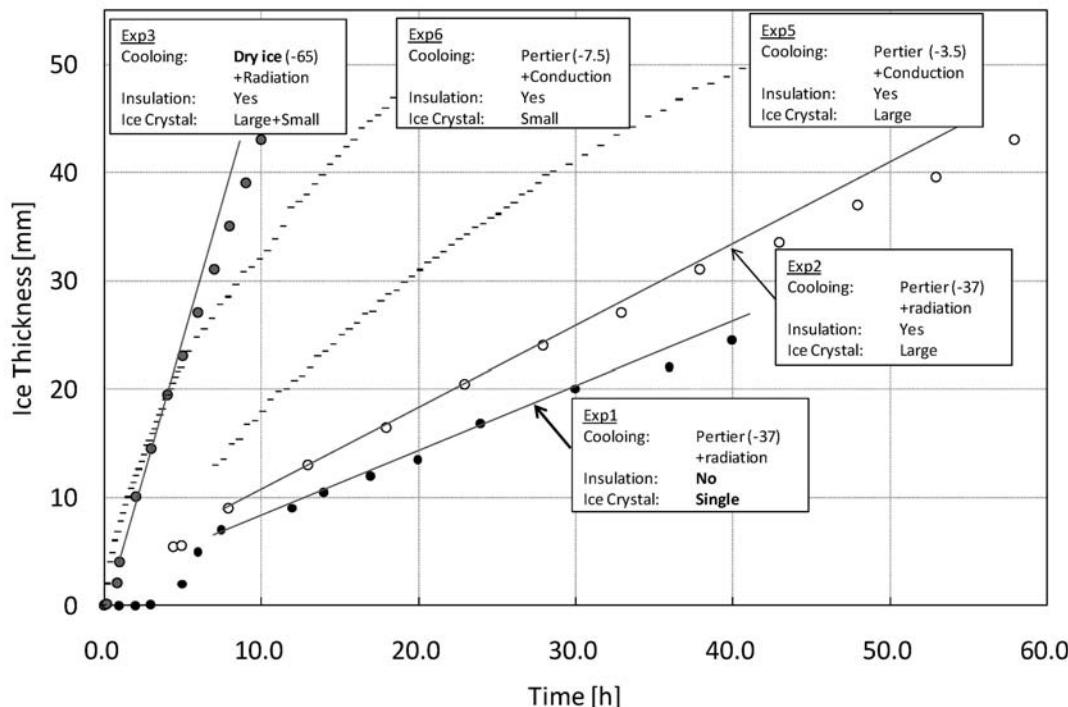


図 7 冷却条件ごとの氷の成長。

Fig. 7 Ice growths in varies cooling conditions.

らかに低下するのに対し、放射冷却ではほとんど低下していないことがわかった。その理由として、日射による氷の内部昇温のように、放射冷却による氷の内部温度低下効果が起こっているものと推測される。

5. 考察

本研究の当初の目的は、「放射冷却」というこれまでに試みられたことのない冷却方法で製氷することであった。結果として、条件によってきわめて透明度の高い容器サイズの単結晶氷が製造できたことから、価値の高い食用の氷を製造できる技術としての展開についての課題を考察する。

以下に、(1)氷の成長速度、(2)気泡取り込みの抑制、(3)単結晶氷の製造条件、の3つの観点での考察を述べる。

5.1 氷の成長速度と気泡の取り込み

放射冷却による製氷においては、冷却面温度が約 -40°C と熱伝導による方法に比べて相当低い場合でも、氷の成長速度は 1 mm h^{-1} 以下である。

しかし、図8に示すように40 mm程度までの範囲では、氷が厚くなても成長速度がほとんど低下していない。従って、厚さのある氷の製造をする場合、受熱板温度の制御によっては伝導製氷に匹敵する成長速度での製氷ができる可能性もある。なお、氷の成長過程に関する理論的検討を付録に追記した。

食用の氷としての価値を高めるためには、気泡を含まないものが望ましい。今回の実験では、水の入れ替えがない状態で製氷を続けているため、液体水中に溶存する気体量が溶解度を上回ると、気泡として析出し、氷の成長に伴い氷中に捕捉された。この課題については、積極的な水循環によって、溶解度の限界を超えないように新鮮な水を供給するといった、既成の技術（山内、1995）の適用によって実現できると考えられる。

放射製氷の場合に氷の成長速度が低下しにくいこと、そして取り込まれる気泡のサイズが小さいこと、の理由は未解明であり、今後の課題としたい。

5.2 単結晶の生成条件

大きな氷結晶を人工的に製造する代表的な技術としては、引き上げ法（たとえば、東・小黒、1967、百武ら、2000）、氷筍法（対馬ら、1998）、減圧法（Khusnatdinov and Petrenko, 1996）がある。百武らの実験では、超純水を用い $1.0 \pm 0.2^{\circ}\text{C}$ 程度の温度制御の育成室で、種子結晶を $13\text{--}20\text{ mm d}^{-1}$ の速度で引き上げ、 $\phi 100\text{ mm}$ の氷結晶を育成した。

対馬らはトンネル内で種水に水を滴下しながら氷筍を育成し、 $10\text{--}15\text{ mm d}^{-1}$ の速度で育成している。Khusnatdinov and Petrenko は、水（ガス抜き処理済み）で満たした容器を入れた密閉容器内を減圧し蒸発潜熱を奪うことで冷却し、自然発生した単結晶が $\phi 100\text{ mm}$ で厚さ 5 mm になるのに $10\text{--}15\text{ 分}$ という高速の製造法を示している。

以上のことと比較して、本論文で示した放射冷却による単結晶氷の製造方法の特徴は次の通りである。

- (1) $50 \times 50\text{ mm}$ の単結晶を、 13 mm d^{-1} の速度で育成できる。
- (2) 未処理の水道水を材料としており、種水を用いていない。
- (3) 育成環境の温度は、 $2.1 \pm 0.3^{\circ}\text{C}$ と、そう精度のよくない制御でも単結晶が製造可能であった（ $+4^{\circ}\text{C}$ を超える霜取り運転も数時間ごとにある）。

以上のように、製造環境の制約が少ないなかで、それほど遅くない速度で単結晶氷が製造できることがわかる。

メカニズムに関しては未解明の課題ばかりであり、また転移、不純物など、氷の質、に関する部分の定量的検討も今後の課題として残るが、可能性のある新たな製氷方法と考えている。

6.まとめ

これまで製氷に利用されることのなかった熱移動形態である放射伝熱による製氷が可能であることを実験的に確認した。そこでは受熱板と水との間に真空層を挿入することで、伝導伝熱および対流熱伝達による熱移動を極力排除するとともに、受熱板表面への霜付きを防止した。

冷却開始から数時間後に初晶が自然発生し、鉛

直下向きに容器サイズ（ $50\text{ mm} \times 50\text{ mm}$ 断面）のまま、水平面を保ちながら成長した。その間の成長速度は、 0.6 mm h^{-1} でほぼ一定であった。生成した氷は、肉眼で見る限り透明で 20 mm 程度の厚さまでは気泡は全く見られなかった。結晶は、偏光板で観察すると全体が単結晶で、成長方向に c 軸の結晶方位を持っていた。

熱伝導による製氷と比較した結果、放射製氷の場合、氷が厚くなても氷の成長速度の低下が少なく、取り込まれる気泡のサイズが小さいという特徴が見られた。

謝 辞

本研究の遂行にあたり、長岡技術科学大学 東信彦教授には、低温実験室および結晶観察機器全般を使用させて頂き、かつ実験結果の解釈について有益な助言を頂きましたことを記し、深く謝意を表します。また査読の過程で頂いた有益な助言が論文の完成度を高めたことに対し、査読頂いた先生方に深謝いたします。

付録：熱伝導冷却と放射冷却の理論的検討

氷の成長過程に関して、理論的検討を試みる。氷の成長速度 v (m s^{-1}) は、次式で求められる。

$$v = q / L \rho \quad (1)$$

ここで、 q は熱流速 (W m^{-2})、 L は凝固潜熱 (kJ kg^{-1})、 ρ は氷の密度 (kg m^{-3}) である。放射の場合の熱流速 q_{rad} は次式で求められる。

$$q_{\text{rad}} = \tau \epsilon \sigma (T_w^4 - T_{ab}^4) F_{12} \quad (2)$$

ここで、 τ は透過率、 ϵ は放射率、 σ はステファンボルツマン定数 ($= 5.67 \times 10^{-8} \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-4}$)、 T_w と T_{ab} はそれぞれ水と受熱面の温度 (K) である。 F_{12} は放射吸支対象物間の形態係数であり、 H の距離に平行に置かれた長さ L_1 と L_2 の平行平板の場合には、次式で求められる。

$$F_{12} = \frac{\sqrt{(W_1 + W_2)^2 + 4} - \sqrt{(W_1 - W_2)^2 + 4}}{2 W_1} \quad (3)$$

ここで $W_1 = L_1 / H$ 、 $W_2 = L_2 / H$

一方熱伝導の場合の熱流速 q_{cd} は

$$q_{cd} = k \frac{dT}{dh} \quad (4)$$

で求められる。ここで、 k は熱通過係数 ($\text{W m}^{-2}\text{K}$)、 dT は受熱面と固液界面との温度差 (K)、 dh は受熱面から固液界面までの厚さ (アクリル板厚さと生成された氷厚さの合計, m) である。

(4)式において、受熱面温度が一定と見なせるならば dT は一定である。氷が成長すると dh は大きくなるから、 q_{cd} は氷成長に反比例して小さくなる。すなわち熱伝導冷却においては、氷の成長は時間の対数関数となる。

一方、放射冷却においては透過材料として見たときのアクリル板と氷の赤外光の透過特性が不明であるため、単純に(2)式により受熱面と固液界面の二面間の放射収支として取り扱うことができない。おそらくは、氷の成長に伴い τ と F_{12} が小さくなっていくものと推測されるから、所定の透過率を持った透過材料の積層構造モデルをえて、理論的に検討することも可能であろう。

その場合、基本データとして氷の赤外光の透過特性および氷中の温度分布の把握が不可欠になる。しかしながら、現時点では単結晶氷生成に影響を与えないように測定できていないため、詳細な検討は次報に譲るとして、ここでは受熱板とアクリル板直下の水面間の放射収支を検討する。

水の温度を 0°C として、ウィーンの変位則より最大単色放射能の波長を求める

$$\lambda_{\max} = \frac{2897}{T} = \frac{2897}{273.15} = 10.6 [\mu\text{m}] \quad (5)$$

となる。アクリル(メタクリル酸メチル樹脂、PMMA)の等価特性は、メーカー公表資料によれば、 $10.6 \mu\text{m}$ での透過率は約 60% である。形態係数 F_{12} は、 $L_1=40 \text{ mm}$, $L_2=40 \text{ mm}$, $H=26 \text{ mm}$ を(3)式に代入して計算すると $F_{12}=0.64$ となる。

受熱面温度を $T_{ab}=236 \text{ K}$ 、固液界面温度 $T_w=273 \text{ K}$ 、水面の放射率 $\varepsilon=0.96$ とする。アクリルと生成された氷の総合の透過率は不明であるから、ここでは $\tau=0.5, 0.6, 0.7$ 、と与えることとする。

以上の条件を(2)式に代入すると、それぞれ $\tau=0.5, 0.6, 0.7$ に対してそれぞれ $q_{rad}=42.8, 51.4, 59.9 \text{ W m}^{-2}$ となる。このとき、氷の成長速度 v は $v=0.46, 0.55, 0.65 \text{ mm h}^{-1}$ となる。

次に熱伝導の場合の、3 mm のアクリル板と成長する所定厚さの氷の積層体における熱通過を、アクリルの熱伝導率を $0.19 \text{ W/(m \cdot K)}$ 、氷の熱伝導率を $2.32 \text{ W/(m \cdot K)}$ (-10°C) として、(4)式で計算をする。

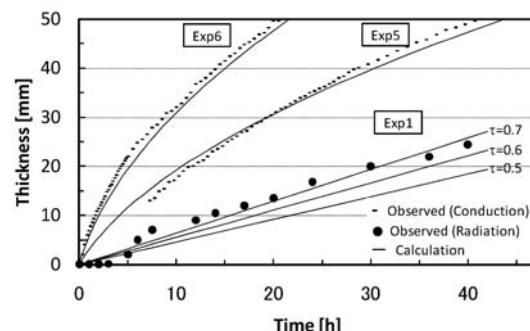


図 8 氷成長の理論的検討。

Fig. 8 Theoretical approach for ice growth process.

以上の条件で計算した結果を図 8 に示す。熱伝導冷却の場合については(2)式による理論値が実験値とおおむね一致している。一方、放射冷却の場合には(4)式による理論式では十分に表現されていないように思われるが、曲線の勾配で見ると、概略、氷が 10 mm 厚さになるまでが $\tau=0.7$ 、そこから 20 mm 厚さになるまでが $\tau=0.6$ 、それ以後が $\tau=0.5$ の場合の理論式の勾配とおおむね一致しているように見える。

以上の検討は、極めてラフなものであり、今後詳細な検討を加えて理論モデルを構築し、氷内の温度分布の詳細な把握によって、メカニズムの解明を進めたいと考えている。

文 献

- 東 晃・小黒 貢, 1967: 引き上げ法による氷单結晶の製作(第1報). 応用物理, 36, 988-994.
- 百武欣二・福田明治・庄子 仁, 2000: 大型氷单結晶の育成. 北見工業大学研究報告, 32, 27-36.
- 対馬勝年・佐藤篤司・阿部 修・吉川 太・木内敏裕・下平昌兵・岡本昭二, 1998: 氷筍大量育成の試み. 第14回寒地技術論文・報告集, 19-24.

- Khusnatinov, N.N. and Petrenko, V.F., 1996 : Fast-growth technique for ice single crystals. *Journal of Crystal Growth*, **163**, 420–425.
山内五郎, 1995 : 無気泡氷. 鋳物, **67**, 349–350.

Study of ice growth under radiation cooling

Seiji KAMIMURA¹⁾ and Shingo HOSHINO²⁾

- 1) Department of Mechanical Engineering, Nagaoka University of Technology,
1603-1 Kamitomioka, Nagaoka, Niigata 940-2188
2) Graduate school of Engineering, Nagaoka University of Technology,
1603-1 Kamitomioka, Nagaoka, Niigata 940-2188

Abstract: In general, ice growth during industrial manufacturing of ice is governed by heat conduction and/or heat convection. Although radiation cooling is observed in nature, e.g., ice formation on roads under cold conditions, radiation cooling has not been employed in the manufacture of ice. The aim of this research is to investigate ice growth under radiation cooling. First of all, an experimental setup is developed and tested. The experimental apparatus consists of a low-temperature heat source, a water tank, and an insulation box. The insulation box is placed between the cold heat source and the water tank in order to prevent conduction and convection of heat between them. The formation of frost on the cold heat source is prevented by reducing the pressure inside the insulation box. Experiments are carried out in a low-temperature room in which the temperature maintained at approximately 2°C. The ice formed is photographed at various stages of its growth using a CCD camera. The first crystal forms spontaneously several hours after the cooling is started. The ice growth rate is almost constant along the vertically direction, and the ice formed is approximately 20-mm thick after 40 h. The average growth rate of ice is found to be 0.56 mm h⁻¹. The ice formed appears to be almost perfectly transparent with no bubbles. A cross section of 50 mm × 50 mm of the ice is found to be composed of a single crystal with the c-axis along the vertical direction. The growth rate of ice under conduction cooling reduces with increasing ice thickness, although it under radiation cooling is maintained almost constant. Involving bubbles inside of the ice under radiation cooling is smaller than them under conduction cooling.

(2008年4月24日受付, 2008年7月9日改稿受付, 2008年7月17日受理, 討論期限2009年3月15日)