



# HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	水面から空気中に伸びた氷の柱
Author(s)	対馬, 勝年; TUSIMA, Katutosi; 鈴木, 重尚 他
Citation	低温科学. 物理篇, 30, 23-33
Issue Date	1973-03-05
Doc URL	<a href="https://hdl.handle.net/2115/18195">https://hdl.handle.net/2115/18195</a>
Type	departmental bulletin paper
File Information	30_p23-33.pdf



## 水面から空気中に伸び出た氷の柱\*

対馬勝年・鈴木重尚

(低温科学研究所)

(昭和47年10月受理)

### I. 序 論

容器内の水の凍結に際して、ごく稀に、水平な凍結面から空気中に向って氷の柱が伸び出ることが知られている。H. G. Dorsey<sup>1)</sup>は鍋に残っていた水が凍って、凍結面上に氷の柱が突きでていたのを見つけた。柱は、太さ3, 4 cm, 長さ10 cmで真上に伸びていた。Dorseyはその後2冬にわたってこの氷の柱の再現を試みたが、ついに成功しなかった。Bally<sup>2)</sup>は、霧の夜、野外に置かれた器の中に、翌朝氷の柱が斜めに伸び出ているのを見た。しかし、このように空気中に氷の柱が伸び出るとは極めて稀な現象だったようで、これらの他に氷の柱を観察したという例をきかない。

ところが、真空中でもこれらに似た現象があり、幾分詳しい観察が行なわれている<sup>3)-7)</sup>。Hayward<sup>5)</sup>や Krausz 等<sup>6)</sup>は真空中で水を凍らせていたら、ある時突然氷の表面から真上に細長い氷の棒が伸び出たと報告している。このような氷の棒が形成される原因として、N. E. Dorsey<sup>7)</sup>は凍結過程で氷が表面をおおうと、容器内の水の圧力が増し、この圧力によって氷の弱い部分が突き破られ、そこから押し上げられた水が凍って氷の棒が出来ると考えた。この考えは Hayward<sup>5)</sup>の観察により明確にされた。彼によると、氷の棒は直径2, 3 mm, 長さ5 cm程度、成長速度約1 cm/secであった。Haywardは高速度写真を解析した結果、氷の棒は管状で、この管の内部を通して押し上げられた水が、棒の先端に半球上に盛り上がり、氷の表面は脈動していたと記している。その後 Krausz 等<sup>6)</sup>も同様の実験を行ない、氷の管は1ないし3個の結晶から構成されていたと報告している。

以上述べてきたように、水面から上に向かって伸び出る氷の柱に関する研究は、もっぱら真空中で行なわれてきた。しかし、真空中に限らず、空気中でも条件さえ揃えば氷の柱の生成が可能なのはである。

そこで、水を入れた多数のシャーレを低温実験室内におき、その凍結過程を観察した。その結果、適当な大きさのシャーレに水を入れて静かに凍結させれば、上述したような氷の柱がかなりの頻度で発生することがわかった。

### II. 実 験

シャーレに入れた蒸留水を  $-10^{\circ}\text{C}$  の低温実験室内において凍結させた。シャーレは大き

\* 北海道大学低温科学研究所業績 第1225号

さが直径7~30 cmで、洗剤と流水とで洗浄した。シャーレ内の中は時間がたつとガラス壁や表面からゆっくりと凍結し始める。しかし、注意深く観察していると表面の全てが水でおおわれることは減多になく、表面にはった樹枝状水の間に多数の未凍結部分（開水面）が散在している。この開水面の1つから氷の柱が成長した。

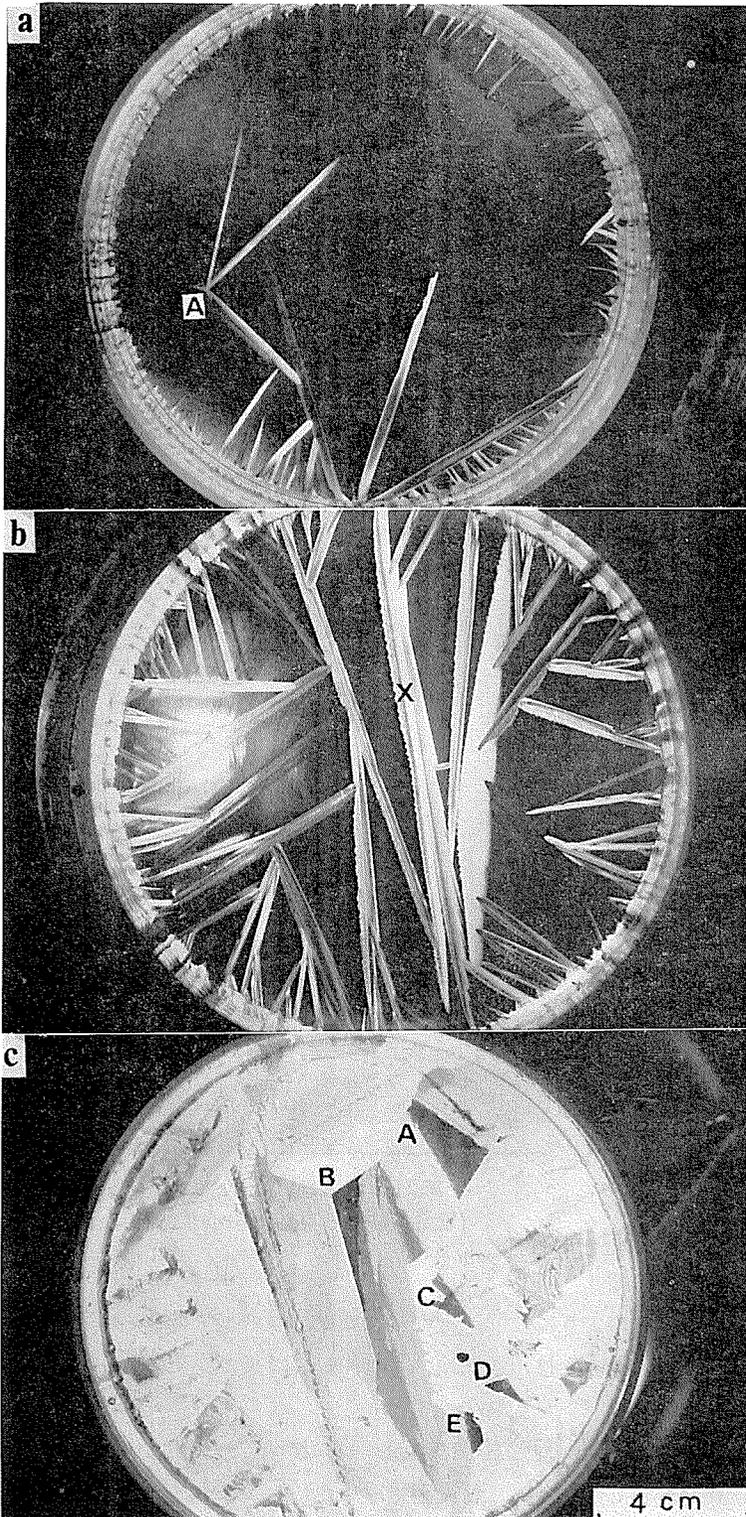
このような凍結過程でできた氷の柱の外形及び結晶学的な特徴を調べた。また成長しつつある柱を、16 mm カメラで微速度撮影を行ない、得られた写真から氷の柱の成長速度を求めた。一方、氷柱形成の核を調べるため、シャーレの中の水面に氷がはり、水でおおわれるまでの凍結の様子を詳細に観察した。

延べ300個のシャーレを用いて氷柱の生成を試みたが、大小20個の氷の柱が得られた。柱の高さは2~10 cmで、最大径が4 cmに達するものまでであった。それらの氷柱の観察によって得られた知見を次節にまとめる。

### III. 実験結果及び考察

#### 1) シャーレ内の水の凍結過程—氷柱の成長核について

-10°Cの低温実験室に水の入ったシャーレを静かに置く。凍結の初期、シャーレの壁に沿って無数の小結晶が発生する。これら小結晶の一部から針状の水が中心部に向かって水面を伸びてゆく。これと同時に水面にも針状氷や円板氷<sup>8)</sup>が発生する。針状氷は幅を殆んど変えないで急速に長くなり、互いに衝突しあうようになる。針状氷の縁からは水中に向かって肉の薄い板状の二次的な枝（これを水中氷と呼ぶ）が伸びる。衝突した針状氷はそこで成長を止める。このようにして、水面は無数の針状氷の網で被われる。この網目の中は未凍結開水面となっている。この領域は上に述べた円板氷の成長によりうめられていく。第1図に凍結過程の様子を示した。写真はいずれも偏光の下でとられた。図aでは容器の縁に沿って無数の小結晶ができ、一部からは針状氷が伸び出ている。図中Aと記したところでは、水面に針状氷の核が発生し、四方八方に針状氷が伸び出ている。この図の偏光写真からは円板氷は判別できない。さらに凍結の進んだ図bでは×印のような水中氷が現われ、水面はかなり網目状になっている。さらに凍結が進むと、図cのように表面の殆んどが水でおおわれてしまう。しかし、図にA, B, …, Eと印した黒い部分は、依然として開水面の形で残っている。これらの開水面の周囲は針状氷と水中氷との壁で囲まれている。そのため周囲の氷が開水面の内部へ急速に侵入することはない。つまり、針状氷や水中氷が開水面をまわりの氷から保護している。しかし、これら開水面の中で新たに凍結核が形成されたり、周囲の針状氷の壁から二次的な枝が伸びたりして、開水面は次々に氷で塞さがれ、最後に一つの開水面だけが残る。この開水面をよく観察すると、水面が周囲の凍結面よりわずかに盛り上がっているのがわかる。第2図aにその様子を示した。盛り上がった開水面の縁は氷の壁で囲まれていて、まわりの水の表面より一段高くなっている。開水面の周囲の表面はほぼ氷で密封された状態にあるので、凍結の進行とともに内部の水の圧力が増し、凍結に伴う体積の増分が最後まで残ったこの開水面に供給される。開水面は盛り上がり、同時にその縁が凍結する。このようにして小さな水の筒ができる。水は次々に供給され、開水面は氷の表面より一段高い筒の先端でさらに盛り上がる。このようにして氷の柱の



第1図 シャーレ内の水の凍結過程を示す偏光写真

a) 凍結初期。シャーレの壁或は内部から針状氷が伸び出ている。b) 針状氷の発達により網目状になった様子。c) 凍結の終末。A, B, C, D, E の黒い部分が未凍結開水面（但し、この写真の試料は同一のものでない）

核が用意され、そこから色々な形をした氷の柱が伸び始める。ここでは一つの開水面から氷柱が4 cm以上に成長した例だけを次の第2項以下で述べる。しかしながら、開水面から常に氷の柱が成長するとは限らなかった。特に、開水面が小さい場合には、凍結に伴う体積増加分の水が、周囲の凍結面上に溢れ出てしまい、氷柱が形成されなかった。

## 2) 氷柱の形態

以上のような方法で作られた氷柱は、その大きさ、形状が複雑多様であった。氷柱の形態を厳密に分類することは困難であるが、外形の特徴から、先細り型、先太り型、単純柱型および複合型に分類した。

### i) 先細り型

これは成長とともに柱の断面が小さくなっていく型(第3図(a))で、氷柱は多くの場合斜めに長く突き出る。長いものでは10 cmに及んだ。断面は円形が多く、柱は三つの結晶から構成されていた。

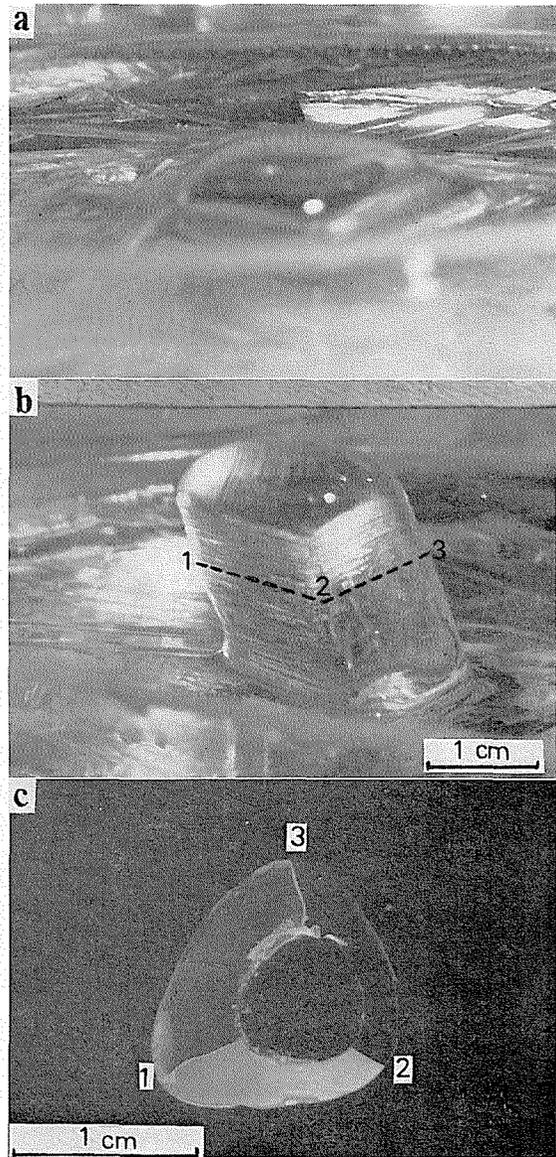
### ii) 先太り型

この形式の柱は成長とともに柱の断面が太くなっていくものである。氷柱の断面は三角形や長い楕円となっているものが多い。柱が伸びるにつれて、氷柱上面の開水面がひろがる。そのため氷柱は先細り型ほど長くはならない。第3図(b, c)がこの型である。根元付近では先細り型となっているが、その先が扇の要のようになり、その後は末広りの型で伸びている。写真にみられる縞模様、気泡、二次、三次の氷柱(図のX, Y)に関しては後で説明する。

### iii) 単純柱型

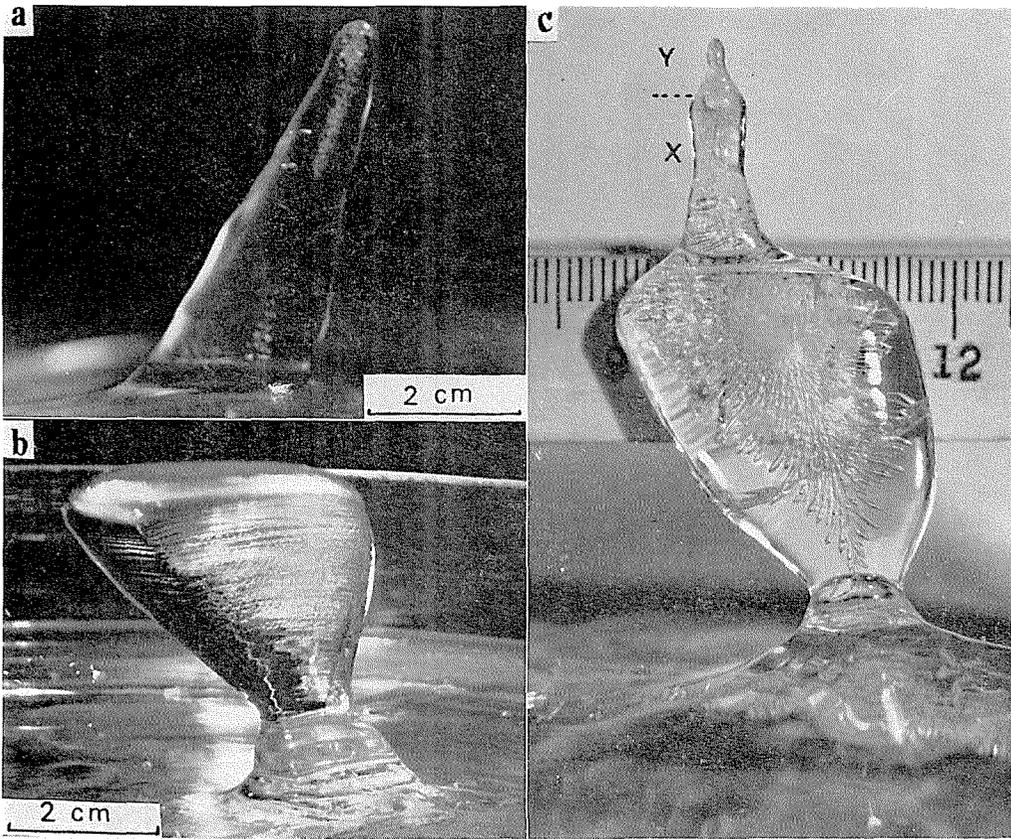
これは、柱の太さが成長中変化しない型である。断面は他に比べて一般に大きく、丸みがあった三角形か平べったい長方形のものが多い。柱の高さは4ないし10 cmであった。

第2図(b)が、この型の典型的な例である。この破線1-2-3にそって切り出した断面の偏



第2図 氷柱核の形成と氷柱の成長

- a) 氷柱核の形成    b) 成長中の氷柱  
c) b)に印した破線1-2-3における横断面の偏光写真



第3図 a) 先細り型の氷柱, b) 先太り型の氷柱, 縞模様が見える, c) 先太り型の母氷柱の上にてきた2次, 3次の氷柱 X, Y

光写真, 図(c)にみられるように, この柱は断面が丸みを帯びた三角形で, 3個の結晶からできていた。この柱の断面, 中央にみえる丸い部分は, 中空の水路で, 柱の成長中, ここを通して水が上に押し上げられていた。

iv) 複合型

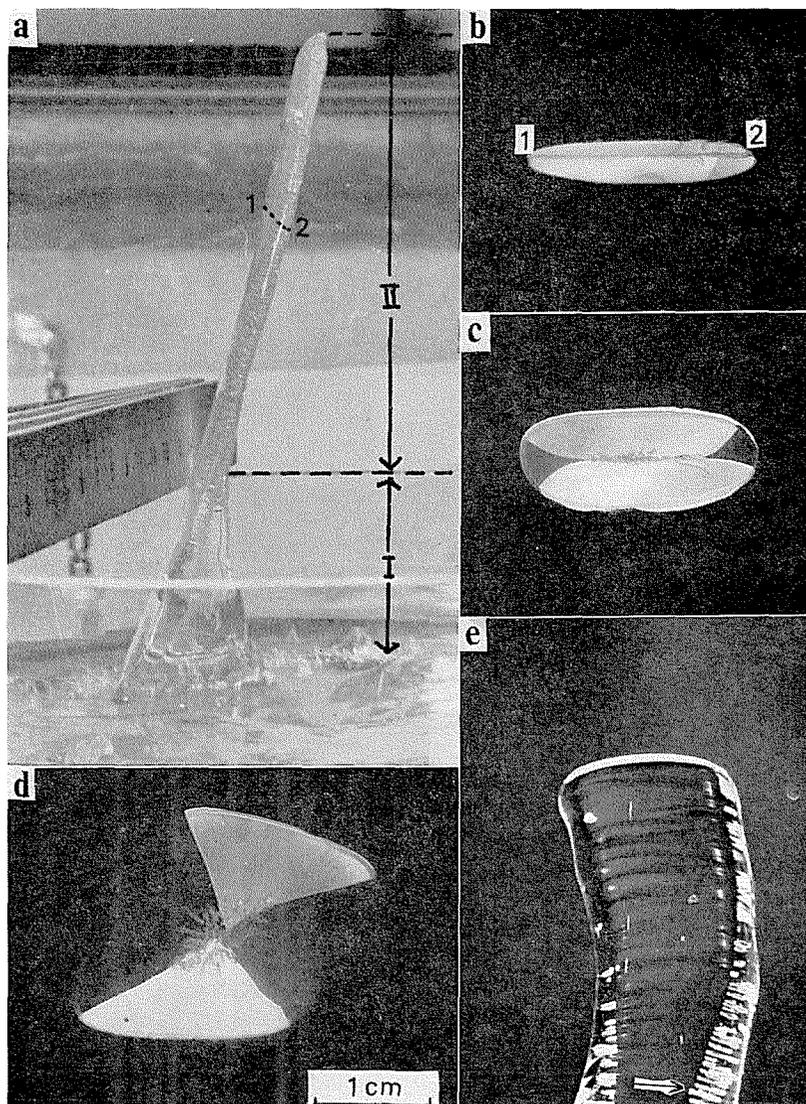
第4図に根元付近の領域Iが先細り型, その上の領域IIが単純柱型となった複合型の例を示した。柱の断面の偏光写真を上から, b, c, dに示した。図bは柱の上部, 領域IIの破線1-2の断面で, 二つの結晶から構成されていた。しかし, 柱の下部, 領域Iの上, 下から切り出した断面は, 図c, dにみられるように, 4つの結晶から構成されていた。従って, この氷柱を構成する結晶の数が, 成長の途中で4つから2つに減少した。

第3図(a), 第2図(b)にみられるような純粋の先細り型や純粋の柱型は数が少なく, 普通観察されるのは, 上に述べた3つの型が組み合わさった複合型である。

3) 成長中の氷柱の観察

i) 氷柱の縞模様

第2図(b)の写真にみられるように, 成長中の氷柱には, 水平方向に並んだ縞模様が多数観察される場合がある。この縞は成長中だけにみられ, 成長停止後しばらくすると見えなくな

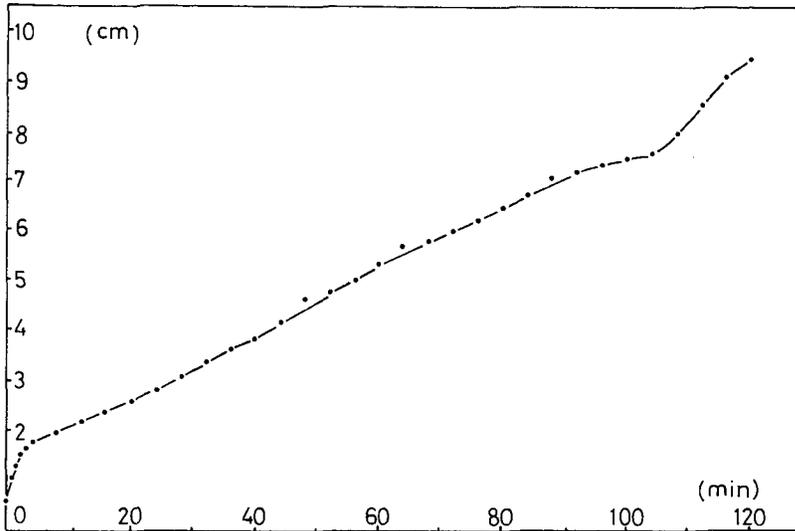


第4図 a) 先細り型(破線から下の領域I)から、柱型(領域II)に転じて成長した複合型例。b), c), d)は夫々、柱の上部(破線1-2)、領域I, IIの境界面、および柱の下部から切り出した横断面の偏光写真。e)は、柱の成長中、柱内部の水の中で気泡が発生し、上昇しているところを示す。図下部の矢の先に、分離しつつある気泡が見える

る。縞の間隔は0.5 mm程度で、一見すると氷柱の外壁にできた波状模様のようにみえる。しかし、真上から観察すると、これは水中に伸びた多数の薄い水中氷の成層構造が、縞模様として観察されたことがわかった。このような縞模様は、単純柱型(第2図(b)), 先太り型(第3図(b))にはよくみられるが、先細り型の氷柱には観察されなかった。水中氷は水が過冷却したときに成長することが知られている。先細り型の柱は比較的細いので、氷柱内の水が過冷却し難く、水中氷が形成されなかったものと考えられる。

ii) 成長速度

次に氷柱の成長速度を 16 mm 映画の解析から求めた。その一例として、時間に対する単純柱型の柱の伸びを、第 5 図に示した。縦軸が柱の高さ、横軸が伸び始めた直後からの時間である。氷柱は最初の 5 分ぐらい急激な成長を示し、その後はほぼ一定の成長速度となった。氷柱成長の最終段階で一度速度が落ちたのち、再び増大した。これは二次の氷棒が突き出るときの遷移過程に対応している。氷柱が定常的に成長しているときの成長速度は約 10  $\mu$ /sec であった。



第 5 図 氷柱の成長速度  
縦軸；氷柱の高さ、横軸；成長開始後の時間

氷柱が成長しはじめてから、伸びが止まるまでには 1 時間ないし 3 時間程度かかった。先細り型の場合は比較的成長速度が早く、先太り型では比較的遅かった。このことは、氷厚の増加速度が一定の場合、氷柱の断面積と氷柱の成長速度との積が氷の体積増加速度に比例しなければならないからである。

氷柱の成長は、柱の中で最も細い部分の水路が閉じることによって止まる。先細り型の場合は先端で、先太り型の場合は根元のくびれたところで水路が断たれる。第 3 図 c の場合は、根元の水路が閉じたのち、先太り氷柱内に閉じられた水の凍結によって、その上に小さな二次の氷柱ができ、同様にして三次の氷柱が形成されたのである。

iii) 氷柱の気泡

第 3 図 a), c) にみられるように、氷柱は透明な外壁部と気泡を多く含んだ中心部とで構成されている。この気泡が、いつ、どのように形成されるかを観察した。

氷柱内の水路が閉じると成長が一旦止まり、氷柱内に孤立した水の凍結が始まる。この水は、それまでの凍結過程によって空気及びその他の気体が濃縮されているので、気体を折出しやすくなっている。事実、気泡はこの段階から発生し始めた。氷柱内の水が凍結しつつある

第4図eでは、氷柱の内壁の水が内側に向かって成長するにつれ、細長い気泡が並んで折出しているのがみえる。浮力のため一部の気泡が水面に浮き上がっていくのが柱の中の白い線分となって写っている。また、矢印で示したところでは、氷柱内壁から水中に分離しかかっている気泡が写っている。このように、氷柱内部の水が凍結する過程で、氷柱の中心線に沿って気泡の多い部分が形成される(第3図(a), (c))。

#### 4) 氷柱の成長条件の考察

以上述べてきたように氷柱が成長するためには次の条件が用意されなければならない。

- i) 容器内の水の凍結過程で開水面が唯一つ存在すること
- ii) この唯一の開水面に供給される水が氷表面に流れ出ることなく、開水面に盛り上がる
- iii) 容器内の水の凍結に伴う体積変化によって氷柱先端に供給される水量の氷柱の増加速度が適当な関係(以下に議論する成長条件)にあること

これらを量的に表現しよう。氷柱が成長している状態では、容器内の水が単位時間に氷に変わることによって増加する体積  $\Delta V_1$  が柱の単位時間の成長体積  $\Delta V_2$  に等しくなければならない。容器内で氷と水が接触している全表面積を  $S$ 、氷厚の増加速度を  $\Delta x$  すると、 $\Delta V_1$  は単位時間に増加した氷の体積  $S \cdot \Delta x$  から、この氷が水のときもっていた体積  $\frac{\rho_i}{\rho_w} \cdot S \cdot \Delta x$  を差し引いたものに等しい。但し、 $\rho_i$ 、 $\rho_w$  は氷及び水の密度。一方、 $\Delta V_2$  は柱の先端の断面積  $A$  に成長速度  $\Delta h$  をかけたものに等しい。

つまり

$$\Delta V_1 = \left(1 - \frac{\rho_i}{\rho_w}\right) S \cdot \Delta x \quad (1)$$

$$\Delta V_2 = A \cdot \Delta h \quad (2)$$

となる。成長しているときは

$$\Delta V_1 = \Delta V_2 \quad (3)$$

これが成長条件である。 $\rho_i=0.917$ 、 $\rho_w=1.000$  として  $\Delta V_1$ 、 $\Delta V_2$  の値を(3)式に代入すると

$$0.0905S \cdot \Delta x = A \cdot \Delta h \quad (4)$$

となる。 $S$  は容器の大きさで定まり、 $\Delta x$ 、 $\Delta h$  は温度の関数である。一般に氷厚増加速度  $\Delta x$  は氷厚が増すと減少する。しかし、この実験で使用された程度の薄い氷に対しては、氷厚が積算寒度に比例すると考えてよいだろう(Ogura)<sup>9)</sup>。事実、本実験でも、 $\Delta x$  は時間に無関係にほぼ一定であった。また、氷柱の成長速度  $\Delta h$  も、あるひとつの実験においては、第5図に示したようにほぼ一定であった。従って、(4)式を丁度満すような面積  $A$  をもった開水面が、たまたま形成されたときに、そこから氷柱が成長しうることになる。

実測された氷柱をもとに、容器内で氷と水が接触している全接触面積  $S$ 、氷柱の平均断面積  $A$ 、氷柱の平均成長速度  $\Delta h$  等の関係を求めてみよう。実験結果によると、 $\Delta h$  は 2~5 cm/hr、 $A$  は 0.5~3 cm<sup>2</sup> であった。 $\Delta x$  は 0.2 cm/hr 前後と推定される<sup>9)</sup>。(4)式を  $S$  と  $A$  の関係に書き改めると

$$S = \frac{1}{0.0905} \cdot \frac{dh}{dx} \cdot A$$

となる。実験によると  $dh$ ,  $dx$  の値は上に述べたように一定の範囲に収まっているので、上式における  $A$  の係数  $\left(\frac{1}{0.0905} \cdot \frac{dh}{dx}\right)$  は各々の氷柱の成長において大きく変化することはなかった。従って、上式は  $S=KA$  ( $K$  は 50 から 500 の値) とみなしてよい。前述のように、開水面が小さ過ぎると、そこからは、氷柱が出現しなかった。また、この実験では  $3\text{ cm}^2$  以上の面積をもつ開水面からは氷柱ができなかった。このように大きな開水面から氷柱を成長させることは不可能でないにしても、かなり困難である。従って、 $A$  の上限は  $3\text{ cm}^2$  程度と考えてよい。このことから容器の面積  $S$  にも上限のあることがわかる。計算によると、 $1,500\text{ cm}^2$  以上の  $S$  を与える容器、つまりシャーレの直径にして  $30\text{ cm}$  以上のものからは氷柱が成長できないことになる。事実、我々の実験では、 $S$  が  $80\sim 500\text{ cm}^2$  の容器以外からは、氷柱を作ることができなかった。但し、以上の議論は  $-10^\circ\text{C}$  で行なった実験結果だけに基つて行なったものである。 $-10^\circ\text{C}$  以外の温度で氷柱を作る場合には、当然氷の成長速度  $dx$ ,  $dh$  の値が異なるため、氷柱ができる開水面の大きさ  $A$  も、以上の値と違うことが予想される。

以上述べてきたように、空気中でできる氷柱は氷柱核をもつ点で真空中にできる氷棒と成長機構を異にすることがわかった。また適当な条件下で実験を行なえば、氷柱の形成は難しいものでないことも判明した。

#### IV. ま と め

従来、稀にしか見られないと言われていた凍結水面から伸び出る氷柱の観察を行なった。その結果、条件さえ揃えば容易に氷柱を作れることがわかった。 $-10^\circ\text{C}$  の低温室内でシャーレに入れた水の凍結過程と、氷柱の形成過程を観察し、氷柱の形成機構を明らかにした。水面の凍結の初期には、水は一様に凍ることはなく、細い氷が網目状に水面を被いながら凍結が進む。氷の網の間に残された開水面は、凍結の進行につれて次々に閉じてゆく。適当な大きさの開水面が最後にたったひとつだけ残った場合、そこから氷柱が成長した。この場合、開水面に水が溢れ出ることなく盛り上がり、その側面が氷の筒となって氷の表面から伸び出していた。氷柱の外形を形態上、先細り型、先太り型、単純柱型、複合型の 4 つに分類した。氷柱の成長速度は室温が  $-10^\circ\text{C}$  の場合、 $2\sim 5\text{ cm/hr}$  で、氷柱は 1 ないし 3 時間で成長を完了した。また氷柱は氷柱核となった開水面の形状に対応して 3 つ又は 4 つの単結晶の柱から構成されていた。複合型の氷柱では、柱を構成する結晶の数が成長の途中で減ることがあった。成長中、氷柱にみられた縞模様、気泡および 2 次、3 次の氷柱についても述べた。最後に氷柱の成長条件に関する簡単な考察を行なった。

低温科学研究所の若浜五郎教授には論文の推敲にあたって多大の指導をいただいた。ここに厚く感謝の意を表します。

## 文 献

- 1) Dorsey, H. G. 1921 Peculiar ice formation. *Phys. Rev.*, **18**, II, 162-164.
- 2) Bally, O. 1935 Über eine eigenartige Eiskristallbildung. *Helv. Chim. Acta*, **18**, 475-477.
- 3) Miller, J. S. 1950 Freezing water by evaporation—a remarkable situation. *Amer. J. Phys.*, **18**, 238.
- 4) 大浦浩文 1952 凍結に際し氷面から生えた氷の棒. 低温科学, **9**, 217-218.
- 5) Hayward, A. T. J. 1966 Growth of ice tubes. *Nature*, **211**, 172-173.
- 6) Krausz, A. S., Harron, B. and Latvan, G. G. 1967 Tubler ice crystals. *Nature*, **215**, 271-273.
- 7) Dorsey, N. E. 1948 The freezing of supercooled water. *Trans. Amer. Phil. Soc.*, **38**, 248-328.
- 8) 荒川 淳・樋口敬二 1951 氷の結晶の成長について. 科学, **21**, 649-650.
- 9) Ogura, Y. 1952 A supplementary note on the problem of ice formation. *J. Met. Soc. Japan*, **30**, 231-239.

## Summary

H. G. Dorsey first reported that when water in an open container froze, an ice column rarely grew into the air from the frozen surface of water. Since then, several other workers reported the similar ice formation in vacuum and some investigators studied such columnar ice in conjunction with the formation of a spike protruded from a hailstone.

There seems to be, however, no detailed description on the initial stage of the growth as well as the structure of this kind of columnar ice.

In the present study, observations were made in detail on the forming process of columnar ice in order to clarify the growth mechanism of the ice protruded from the solidified surface into the air.

Distilled water was put in many glass shells of 7-20 cm in diameter and 3 cm in depth, and it was frozen in a cold laboratory at  $-10^{\circ}\text{C}$ . The freezing process of water was observed under a polarized light, which is illustrated in three photographs of Fig. 1 in the text. A number of tiny ice crystals first appeared on the wall of the shell, from which dendritic crystals began to grow (Fig. 1-a). They grew rapidly and soon covered the surface of water leaving a number of areas with small open water among them (Fig. 1-b). Dark areas marked with A, B, ..., and E in Fig. 1-c indicate open water found at the end of the freezing process. The number of the open water areas became smaller with time, and at last there remained only a few open water areas with triangular or quadrilateral shapes. It was found that only when there remained one open water area covering  $1-3\text{ cm}^2$  by chance in the frozen surface, columnar ice started to grow from the open water. In other words, columnar ice was rarely formed when more than two open water areas remained in the solidified surface. Gradually pushed up by the increasing of water pressure due to the further freezing of water in the shell, the surface of this isolated open water area remaining only one became higher than the frozen surface as shown in Fig. 2-a. At the same time, the marginal rounded surface of the elevated open water was frozen, forming, a thin wall of ice around it. The surface of the water in the ice wall was continuously pushed up to the top by an increase of internal water pressure. Columnar ice gradually grew in

this way at a nearly constant growth rate of  $10 \mu/\text{sec}$  at  $-10^\circ\text{C}$  until the freezing of water in the shell was completed (Fig. 5). A stripe pattern showing a layerlike structure was observed on the wall of simple columnar or inverse triangular type during its growth, and the pattern disappeared after the ice column was completed. It was confirmed that the pattern was due to the layered dendritic ice crystals extended out the inner wall of ice to the water in the ice column. As soon as the growth of the columnar ice stopped, the water still contained within the ice column began to freeze leaving a number of air bubbles as shown in Fig. 4-e. During the freezing, another small ice column was sometimes formed on the top of the columnar ice (Fig. 3-c). The size of the columnar ice was 4-10 cm lengthwise and 3-4 cm in thickness.

Columnar ice observed in the present study can be classified into four types by shape: (1) tapered column (Fig. 3-a), (2) inverse triangular column (Fig. 3-b, c), (3) simple column (Fig. 2-b) and (4) combined column (Fig. 4).

A growing ice column was cut and its cross section was examined under a polarized light (Fig. 2-c). A water channel was found along the long axis of the column through which water was supplied to the top of the column from below during the growing process. As seen also in this figure, the ice column was composed of three ice crystals which originally started to grow from the three sides of the triangular-shaped open water.

An ice column started from a quadrilateral shaped open water area usually consisted of four crystals at the early stage of the growth. Fig. 4-d shows a cross section cut out of the lower portion of the ice column shown in Fig. 4-a. In this ice column, however, two of them disappeared at the later stage of the growing process and only two other crystals remained at the last stage of the growth as illustrated in Fig. 4-b, which shows the cross section cut from the upper portion of the same ice column marked with the broken line 1-2 in Fig. 4-a.