

埼玉学園大学・川口短期大学 機関リポジトリ

Production of Tyndall Figures by Using Ice Stalaglite

メタデータ	言語: jpn 出版者: 公開日: 2017-07-28 キーワード (Ja): キーワード (En): 作成者: 高橋, 忠司, 大石, かおる, 松橋, 美穂 メールアドレス: 所属:
URL	https://saigaku.repo.nii.ac.jp/records/690

This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial-ShareAlike 3.0 International License.



氷筍を使ったチンダル像の作成

高橋 忠司* 大石かおる**

松橋 美穂***

1. はじめに

近年、科学館やサイエンスショーのイベントで、雪や氷を使った実験の一つとして、チンダル像を作って、観察してもらい、好評を博している。チンダル像はイギリスの科学者チンダルが、アルプス氷河の氷を太陽光にかざしたときに、氷の内部で融解が起こり、雪の結晶に似たような形が現れることを発見したことから、彼の名前にちなんでつけられた名称である。それ以来、多くの科学者によって研究されてきた。中谷（1956）は六方対称形の樹枝状のチンダル像について、氷の結晶軸との関連や光の照射強度との関係について報告した。また、Higuchi（1964）は六方対称でない十字の形をしたチンダル像を発見し、氷の結晶軸との関係を調べた。また、Maeno（1968）はチンダル像の発生の源になる核について報告している。

チンダル像を作成するには、単結晶氷が必要である。中谷やHiguchiはアラスカ氷河や北極海の氷島の氷を使って観察している。近年、市販の冷凍庫を利用して単結晶氷を作成する方法も紹介されている（中谷宇吉郎雪の科学館；2007）。本研究では氷筍を用いることとした。氷筍は天井からしたたり落ちた水滴が床に衝突して凍結し、上に伸びたものである。寒い地方のトンネルなどで、多く見られるが、富士山の氷穴においても観察されている。対馬等（1983）は黒部峡谷のトンネルにできた氷筍の形・大きさ・結晶粒の数・結晶軸の方向について科学的に調査を行った。その結果、天然の氷筍は根本付近を除くと大きな単結晶粒からなっていることを明らかにした。さらに、対馬・斎藤（1996）は人工的に氷筍を育成する方法を開発した。本研究では市販のアイスボックスを用いて人工的に育成した氷筍を試料として使って、チンダル像を作成することを試みた。

* 川口短期大学こども学科

** 株式会社ウェザーニューズ

*** 上尾市立大谷小学校

① 実験装置

対馬・斎藤は低温室内で、氷筍を人工的に作成し、氷筍の成長に対する水滴の落下間隔、水温、室温の影響を調べた。彼らの方法では装置がおおがかりであるという欠点があった。本研究では低温室を使わず、内容積が高さ 55 cm, 幅 39 cm, 奥行 21 cm のアイスボックスを使った。市販のアイスボックスは庫内温度が -18°C に設定されているが、温度調節器を取り替え、 0°C から -20°C まで温度を変えられるようにした。市販のアイスボックスは電源の ON/OFF によって温度を調節するため、庫内の温度の変動が大きかった。このため、庫内に鉄製の二重の筒を入れ、筒の間に不凍液（エチレングリコール）を入れ、温度の変動を小さくした（図 1）。それでも、氷筍作成中に 5°C 程度の温度変動があった。滴下装置として、初めに点滴器具やガラスコックを用いたが、滴下間隔を一定に保つことができなかった。対馬・斎藤にならい、発泡スチロールの水槽にガラス毛细管（内径 0.5 mm）を通して滴下した。一滴の体積は 0.08 ml であった。滴下間隔を一定にするためには、水槽を 2 段にすることが効果的であった。この装置での滴下間隔は 20～40 秒であった。氷筍作成中に何回か滴下間隔を測り、水槽に水を足して、間隔を調節した。滴下間隔を長くするためには、ガラス毛细管に太さ 0.1 mm の鉄線を通したもので、滴下した。毛细管の先端部（滴下位置）と底から 17 cm の高さでの温度（筒内温度）を熱電対で測定した。

② 実験方法

筒内温度が 0°C 以下になったのを確認した後、予め得ていた単結晶の水板を種結晶として筒の底に置く。氷筍作成中は室温・水温・筒内温度・滴下位置の温度・滴下間隔・氷筍の高さを測定した。4～5 日で氷筍ができるので、滴下を停止し、氷筍を取り出す。高さとも最も細い部分と太

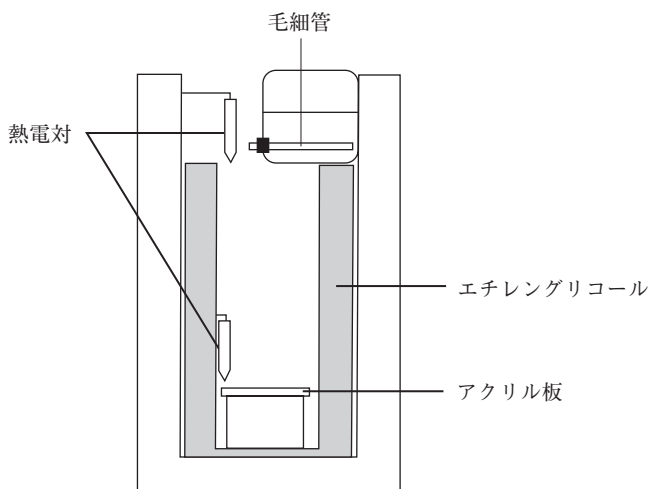


図 1 氷筍作成装置

い部分の直径を測定する。氷筈は鋸で輪切りにした後、ホットプレートを用いて厚さ 5 mm ほどに調節する。偏光装置付き実体顕微鏡で作成した氷筈試料の結晶構造を観察した。

③ 筒内温度と滴下間隔が氷筈の成長に与える影響

筒内温度と滴下間隔変え、29 回の実験を行った。結果を多結晶氷筈・単結晶氷筈・未成長に分け、筒内温度や滴下間隔との関係を図 2 に示した。ここでいう単結晶氷筈とは大きな単結晶を持つ氷筈をさす。それ以外の氷筈を多結晶氷筈とした。

筒内温度が -4.0°C 以下で氷筈が成長した。筒内温度が低すぎると、細く高さがある氷筈が成長したが、多結晶氷筈であった。筒内温度が $-6.0\sim-7.0^{\circ}\text{C}$ で比較的太さも高さもあり、大きな単結晶を持つ氷筈が成長した。筒内温度が一定の場合、滴下間隔が短すぎると氷筈は成長せず、また滴下間隔が長すぎると多結晶氷筈になった。氷筈は滴下された水滴が氷筈先端に衝突後、凍結して成長する。凍結の際に放出される潜熱がどれくらい早く氷筈先端から逃げるかが重要である。滴下間隔が短ければ、次の水滴がすぐに供給され、筒内温度が高いと十分に潜熱が逃げ切らないので氷筈は成長しない。筒内温度が低く、滴下間隔が長いと滴下された水滴は直ちに凍結し、多結晶となる。従って、単結晶の氷筈を得るには滴下された水滴の凍結速度が適当な値になるように、筒内温度や滴下間隔を調節しなければならない。

④ 氷筈の結晶構造

氷筈の根本付近には多数の結晶が放射状に分布し、先端にゆくほど大きな単結晶が見られた。この傾向は対馬・斎藤の結果と一致した。図 3 は本研究で得られた最も大きな単結晶を有する氷筈であり、その結晶構造の模式図を図 4 A に示す。また、図 4 B は大きな結晶を持つ氷筈の典型

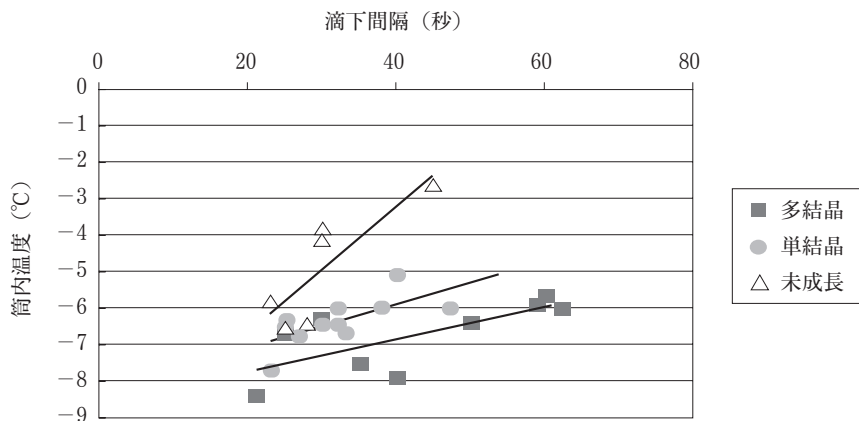


図 2 筒内温度（氷筈が成長する高さの温度）と滴下間隔による氷筈の成長形態の違い

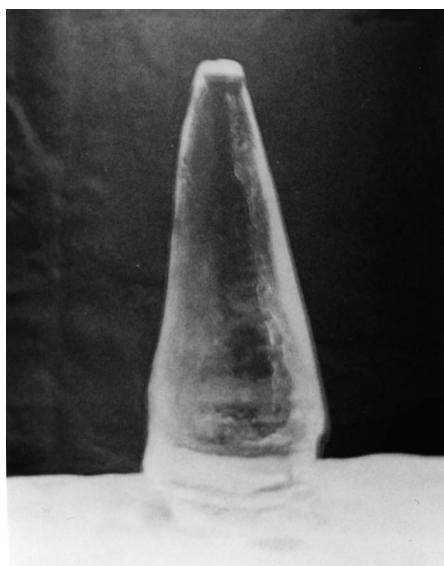


図3 氷筍 I

筒内温度 = $-6.7 \sim -1.4^{\circ}\text{C}$, 滴下間隔 = 30~36 秒,
氷筍の高さ = 24.2 cm, 直径 = 1.1~8.7 cm

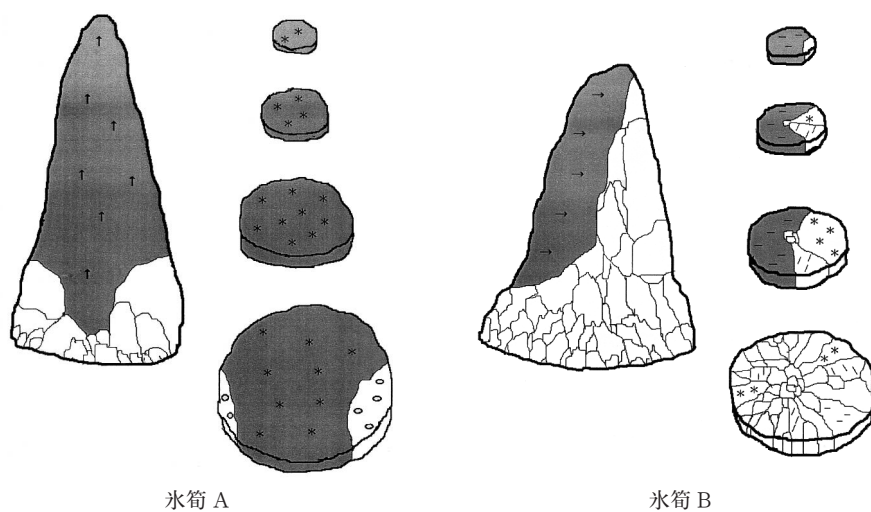


図4 氷筍の結晶構造

矢印は C 軸の方向を示す。A は氷筍 I, B は本研究で得た典型的な単結晶氷筍 (高さ = 30.5 cm, 直径 = 2.3~9.2 cm)

的な例である。実験から $-6.0 \sim -7.0^{\circ}\text{C}$, 滴下間隔が 30 秒前後で成長した氷筍が大きな単結晶を持つことがわかった。

20 個の氷筍について 68 個の隣り合う結晶の C 軸間の角度を調べた (図 5)。ここで言う C 軸

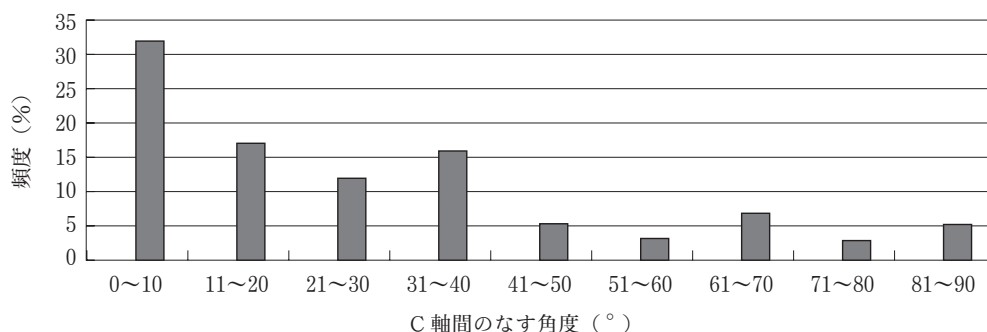


図5 氷筍の隣り合う結晶のC軸間のなす角度

間の角度は輪切りにした氷筍試料面に投影されたC軸間の、二次元面での角度である。10°以下が最も多く20°以下の場合が約半数になった。このような試料を偏光顕微鏡で観察すると、一見、単結晶のように見えても、試料を回転させると微妙に色が変化することになる。

3. チンダル像の観察

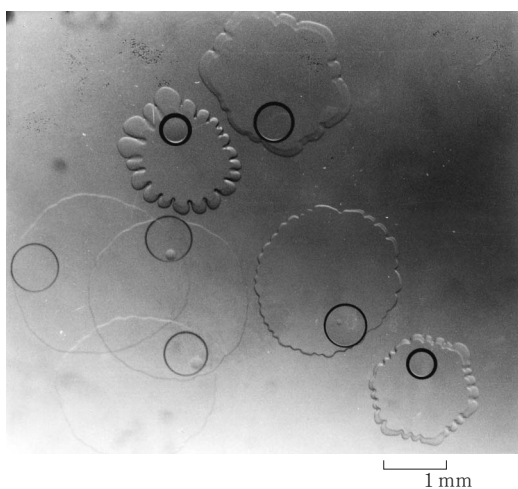
① 実験方法

氷筍から切り出した試料に500 Wの赤外線ランプを照射し、チンダル像を観察する。氷と水の屈折率の差が小さいため、チンダル像の境界は観察しにくい。顕微鏡の光路に偏光板と偏光フィルターを入れ、直交ニコルの状態から僅かに偏光フィルターを回転させると少しではあるが明暗がついて観察しやすくなった。

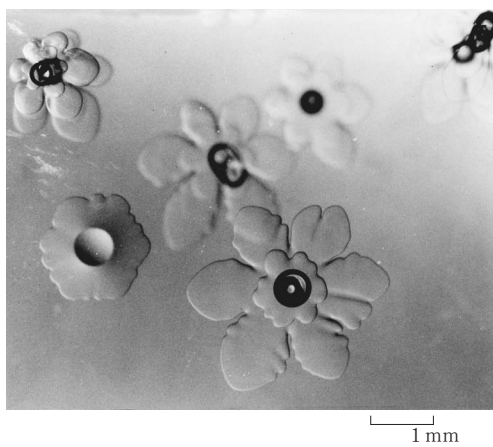
② 照射量の影響

赤外線ランプの照射位置や照射時間を変えて、照射量を変化させるとチンダル像の形は変わってゆく。初めは円板状であったものが、次第に大きくなって、周辺にギザギザが現れ、雪結晶の六花型のような形に成長してゆく(図6a, b)。照射量強い場合には、雪の結晶の樹枝状やシダ状結晶のような形に成長してゆく(図6c)。一つ一つのチンダル像の内部に円形の気泡が存在する。これは氷が水になると体積が減少するために生じたもので、この内部には空気は存在せず、水蒸気があるだけである。

チンダル像が一つの単結晶内部では、結晶軸に対して同じ平面内に存在することは、チンダル像を真横から観察することによってわかる。図7ではチンダル像が全て同じ方向(C軸に直角な面内)に配列し、その厚さが数10 μm の薄い板状であることがわかる。この特徴は雪の板状結晶と同じである。



(a) 照射量小 円板状や周辺にぎざぎざが見られる像



(b) 六花型のチンダル像



(c) 照射量大 六花型からシダ状への成長

図6 光の照射量とチンダル像

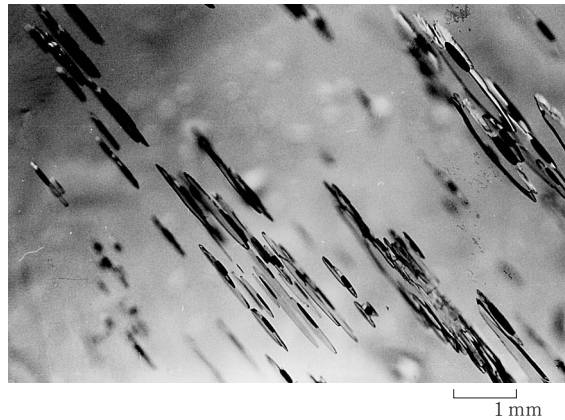


図7 真横から観察したチンダル像

③ 結晶粒界に成長したチンダル像

結晶粒界では水分子の結合力が弱く、光を照射すると内部融解が起こりやすい。このような場合には、六花型のチンダル像とは異なり、不規則な形をした像が観察されることを Maeno は報告している。人工的に作成した氷筍では根本付近で結晶軸の方向がわずかに異なる結晶が放射状に配列することが多く、このような試料に光を照射すると、結晶粒界に沿って、不規則な像が成長することが観察された（図8）。このような像の特徴は樹枝の小枝が主枝からほぼ直角に伸びていることである。また、六花型のチンダル像がC軸に垂直な面内で成長するのに対して、C軸に平行な面内で成長している（図9）。これらの特徴は Higuchi が報告している“十字型のチ

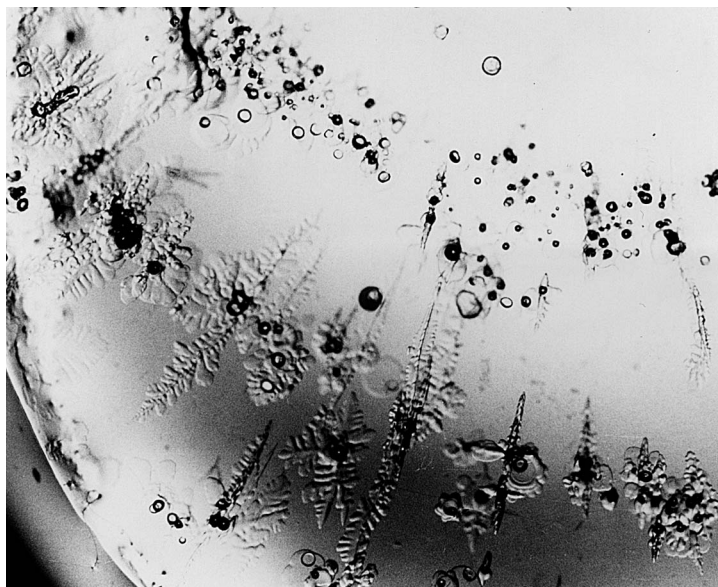


図8 結晶粒界に沿って観察された不規則な像

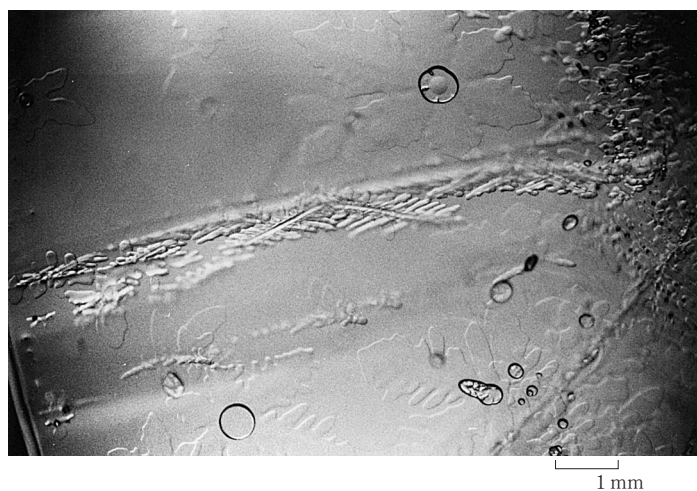


図9 C軸方向が僅かに異なる結晶の粒界に成長したチンダル像

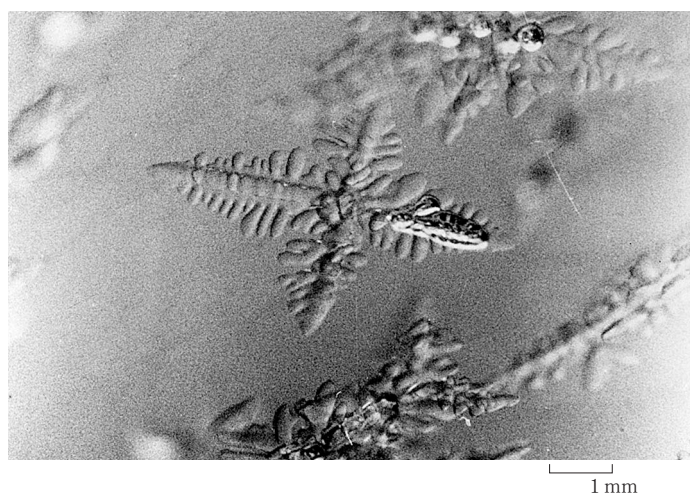


図10 十字のチンダル像

ンダル像”と一致する。今回観察したチンダル像の中にも“十字のチンダル像”が観察された(図10)。

4. ま と め

チンダル像を観察するためには、単結晶の氷が必要である。本研究は人工的に氷筈を作成し、それから得られる大きな単結晶の部分を用いることとした。氷筈は市販のアイスボックスの中で、ガラス毛细管（内径 0.5 mm）から水滴を滴下して作った。氷筈の根本付近は多結晶であるが、

先端に行くほど大きな単結晶が見られた。大きな単結晶を持つ氷筥を成長させるには、筒内温度（氷筥が成長する部分の温度）が $-6.0\sim -7.0^{\circ}\text{C}$ 、水滴の滴下間隔が30秒ほどが最もよかった。チンダル像の観察から、これまで報告されてきた以下の特徴が確認された。

- ① 光の照射量により、円板状から、六花型・シダ状へと変化した。
- ② 氷が水に変わるときに体積が減少するために、中央に円形の気泡ができる。
- ③ 氷の結晶C軸に垂直な面内で成長し、その厚さが数 $10\mu\text{m}$ の薄い板状である。従って、一つの単結晶の内部では同じ方向に配列する。

六花型のチンダル像の他に、結晶粒界の内部融解による不規則な像が観察された。これらの像の中で、C軸が僅かに異なる結晶粒界で観察された像のなかには、C軸に平行な面内に成長し、主枝から小枝が直角な方向に伸びる像が観察された。この特徴はHiguchiが報告した“十字のチンダル像”と一致するものであり、“十字のチンダル像”が結晶粒界のように、構造的に弱い部分に成長することを推察させた。

参考文献

- Higuchi, K., 1964; Tyndall figures formed in crystallographic plane perpendicular to basal plane of ice crystals. *Nature*, No. 4931, 485-487.
- Maeno, N., 1968; Nuclei of Tyndall figures and surface melting of ice. *Canad. Jour. of Phys.*, 46, 313-315.
- 中谷吉郎, 1956; 氷単結晶の物理 — 1. 内部融解からみたその構造 —, 科学, Vol. 26, 272-279.
- 中谷吉郎雪の科学館, 2007; 学習テキスト 「氷であそぼう」
- 対馬勝年・斉藤好弘, 1996; 氷筥の人工育成, 富山県地学地理学研究論集, 11 巻, 142-147.
- 対馬勝年・中川正之・川田邦夫, 1983; 氷筥, 雪氷, 45 巻, 197-200.

(2012 年 9 月 28 日提出)