



Title	静水面における氷殻形成の観察（序報）
Author(s)	藤野, 和夫; FUJINO, Kazuo; 鈴木, 義男 他
Citation	低温科学. 物理篇, 18, 149-155
Issue Date	1959-11-20
Doc URL	<a href="https://hdl.handle.net/2115/17962">https://hdl.handle.net/2115/17962</a>
Type	departmental bulletin paper
File Information	18_p149-155.pdf



## 静水面に於ける氷殻形成の観察\* (序報)

藤野和夫\*\*・鈴木義男\*\*\*

(北海道大学 理学部地球物理学教室\*\* 低温科学研究所海洋学部門\*\*\*)

(昭和34年7月受理)

### I. ま え が き

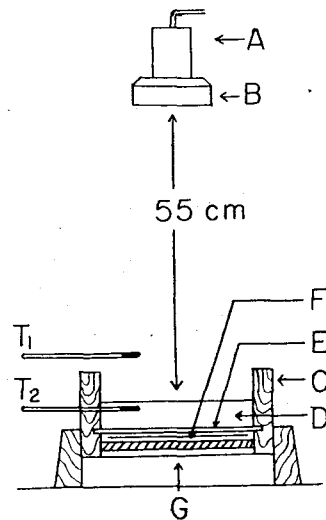
成長した海氷は結晶軸がほぼ水平になつたモザイク構造をしている<sup>1)</sup>。

水及び種々の水溶液から氷のできる時、まず氷晶と呼ばれる小さな氷の結晶があらわれることは良く知られており、これについては多くの研究がある<sup>2)-7)</sup>。海水に於てこの様な氷晶がどのようにしてモザイク構造をもつた氷に成長してゆくかを知ることは、海氷の構造を理解する上に重要な事と思われる。

実験室内で試水を上から冷却して、できた氷殻を調べる実験は、既に行われているが<sup>2), 8)</sup>氷晶からの成長過程は詳しく調べられてはいない。筆者等はこの過程を観察する事を試みつつあるが、この論文では水面が一応氷に覆われる迄の観察を報告する。

### II. 観 察 方 法

筆者の一人はかつて現場海水に於ける氷晶生成を偏光で観察したが<sup>9)</sup>、その時の方法は主軸が水面に垂直な氷晶を認める事が出来ないと云う欠点がある。それで今回の観察には樋口による影写真法<sup>3)</sup>を利用した。装置の概略は第1図に示す。水槽(C)は木製で内径 $15 \times 15 \times 6 \text{ cm}^3$ 、底はガラス(E)をはり、更に印画紙(F)を下からガラスに密着させる為と、下面からの冷却を防ぐためにフェルト張りの木板(G)が側壁に蝶番でとりつけてある。光源(A)は6V 30Wの顕微鏡用電球で、ソルトンシャッター(B)をつけて水面上約55cmに置いた。印画紙にはフジプロマイドF5を用い露出1/2秒で鮮明な影写真が得られた。 $T_1$ 、 $T_2$ は気温及び水温測定用アルコール温度計で水槽にゴム栓で固定してあり取り外し出来る。約500ccの試水を用いた時、 $T_1$ は水面上約3cm、 $T_2$ は



第1図 装置概略

\* 北海道大学低温科学研究所業績 第535号

水面下約 3 mm の所にある。

あらかじめ適当に冷却した試水を常温の部屋で水槽に入れ、これを低温室（気温 $-12\sim-20^{\circ}\text{C}$ 、もちろん印画紙に対しては暗室としてある。）に設置した光源の下に持ち込み、自然凍結させる。最初の結晶の発生した時から、氷が水面を覆う迄、1分間隔で影写真をとる。その後  $T_2$  を抜いて排水してから氷を取り出して、レプリカ被膜によるエッチピット法<sup>10)</sup>で結晶軸を調べた。

### III. 観 察 結 果

試水としては、イオン交換による蒸溜水、水道水、及び小樽港外で採水した海水（塩素量 18.01‰）を用いた。

最初に結晶を認めた時の水温は、蒸溜水の 5 回の観察では  $-0.6\sim-1.8^{\circ}\text{C}$ 、水道水の 4 回の観察では、 $-0.4\sim-1.8^{\circ}\text{C}$ 、海水の 8 回の観察では  $-2.8\sim-2.9^{\circ}\text{C}$  であつた（この海水の結晶温度は三宅<sup>11)</sup>によれば  $-1.81^{\circ}\text{C}$ ）。これ等と気温（ $-12\sim-20^{\circ}\text{C}$ ）及び初水温との間にははつきりした関係はない様である。又水槽の温度ははじめ水温よりかなり高く、又熱容量もかなり大きいので、最初の結晶は常に器壁から離れた所に発生した。なお、水槽には覆いが無いから低温室内を浮遊する霜の微片が水面に落ちて凍結核となることも考えられる。

海水、水道水、蒸溜水の各々について代表的な例を図版に示した。蒸溜水と水道水との間には特に差はないので以下両者を真水と呼び、海水と分けて、筆者等の観察結果を述べることにする。

#### 1) 海 水

氷晶はほとんど六花に限られ、わずかに羽毛及び針（その最も特徴的な例は図版 I 上図の白丸内のもの）をまじえる。8 例中 2 例では氷晶数は真水の場合と同様に数個であつたが、6 例では氷晶数は 100 以上に達した。これ等の氷晶は水面上に at random には分布せず、いくつかの曲線上にのつている様である。最初の写真に見られる氷晶の大きさは一様ではないから、これ等の氷晶は瞬間的に発生したのではないかも知れない。（ここで発生という語は、水中にあらかじめ肉眼や写真では認められない凍結核が存在すると考える立場に立つて見ればこれ等の凍結核が肉眼で認められる様な大きさに成長を始めることを意味する。）しかし以後の写真に於て氷晶の数がほとんど増加していないから、海水に於ては氷晶は極めて短時間内に多数発生するといえる。

これ等の氷晶は水中で発生して水面に浮び上る様にみえた。浮び上つた六花は水面に平行になるが、表面は水面上には表れないで、いくらか水をかぶつている様である。なおこれ等の六花の中心に円板の認められるのはごく少数であつた。羽毛状の結晶は水面に平行ではなく、その軸は水面に対して傾斜している。

やがて水面は六花で覆われてゆくが、ある程度六花が成長密集してゆくと、影写真上にボケが現れて来る。このボケは自由水面に向つて生長しつつある周辺部にはあまり認められない。

水面が完全に覆われた所で排水をして、結晶の生長を止め、表面の氷殻をとり出して裏面から観察する(海水は強度が充分でないので完全な氷殻を取り出すのは難かしく、いくつか割れることが多い)。

氷殻を裏面から観察すると、六花が重なり合つて鱗状になっている。鱗状の階段の高さは大体 0.3 mm 程度である。又重なり合つた鱗片は密に氷着してはおらず、間にはブラインが入っている。羽毛は氷殻の裏面から飛び出して伸びている。

氷殻の厚さは一様ではなく、厚い所は 3 mm 以上にも達しているが、薄い所では 1 mm 程度である。

海氷については、3% レプリカ液をかけて数 10 時間放置しても、エッチピットは生じなかつた。

## 2) 真水

真水の場合に表われる氷晶は羽毛状と針状のものが大部分であつたが、時には六花も認められた。この六花は中心に円板が認められた。静かに冷却した場合には円板は現われず、器壁に針状結晶が出来てから攪はんした際にのみ円板が発生した(図版 VIII)。

初期に針状に見える氷晶は、その生長過程から、2つに分けられる。1つは最終状態迄針状であるもの(図版 V 矢印)。又他の1つは羽毛状に似た生長過程を示すものである。後者に於ては主軸はほぼ直線的で片側には羽毛状と同様に樹枝状結晶が水面に平行にのび、(図版 VII G) 他の側では水面と傾斜して水中にのびている(図版 VII F) 実際この部分は、氷殻を取り出して見ると裏面に飛びだして成長している。

羽毛状結晶も初期には軸だけであつて、ある意味では針状であるが、普通この軸は弧状をしており、また太さも先細の外観を呈している。成長に際しては弧の外側では極めて規則的な樹枝状を呈する(図版 VII C, E) が、弧の内側は格子状に成長する(図版 VII H)。そして両側とも成長面は水平である。弧の曲率の大きな時には格子は不規則になり一見アメーバー状を呈する。以上の水面に水平にのびた部分も、すべて表面は水に覆われている。

格子状の部分には特有の一見気泡状の白点が現われ、成長するにつれて黒点となる。これは観察によれば明らかに気泡ではなく、格子がぶつかつた所で氷がまくれ上つて半球状になつたものである。まくれ上つた部分が元の水の上を覆つた水の中で成長したのではないかと思われるが今後の研究によつて確かめたいと思う。

真水の場合氷殻は強固であり、その厚さはほぼ一様で、海水の場合の様に薄片状結晶が重なりあつたのではなく、表面を覆つた母結晶がその厚みを増したものの様である。

真水の場合にはレプリカ膜によるエッチピットが容易に得られた。

図版 VII-14 は、実験番号 17(図版 V, VI) で得られた氷殻の表面に 3% レプリカ液塗布後、20 時間に於けるエッチピットの顕微鏡写真であり、その氷殻上の位置は図版 VII-13 に対応する番号で示した。

#### IV. 結果の検討

海水の場合に初期に現われる氷晶数が極めて多いと云う事は、空中に浮遊する霜の微粒子以外に海水自体のなかに凍結核が存在する事を示す様である。海水中の溶質イオンが凍結核になると云う事も考えられる。

海水の場合の氷晶の配置は、海水を上方から冷却した場合に起る対流に関係がある様に思われる。この対流によつて出来る収斂線上に氷晶が並ぶのではないだろうか。

海水の成長過程に見られる写真のボケの原因としては、海水の裏面が平面ではなく鱗状の凹凸が出来ているためとも考えられるが、又氷の成長に伴つてその附近に塩分の濃いその他の部分と屈折率も密度も異なる海水が出来、そのゆらぎのために起る一種の“かげろう”現象とも考えられる。そのいずれであるかは今回は未だ確めていないが、この事も含めて影写真の解読と云う点については今後系統的な研究が必要と思われる。

氷晶形については、筆者等の観察は、熊井・板垣<sup>14)</sup>及び荒川<sup>5)</sup>等の報告とも良く一致している。すなわち、氷霧粒を人工的に水面に seed する実験に於て、試水として食塩水を用いた場合に氷晶は殆んど円板より成長した六花であつた。荒川・樋口の 3% 及び 0.3% 食塩水の例<sup>9)</sup>を比較すると、中心円板の大きさは、3% の方が遙かに小さい。筆者等の海水の溶質濃度は 3.3% 程度である故、中心部の円板が殆んど認められないのは当然であり、筆者等の六花も又円板から成長したと考えてよいだろう。荒川の同じ実験によれば<sup>5)</sup>、蒸溜水に於ては氷晶形は過冷却度に左右され、過冷却度が大きくなると共に円板が減して、針及び羽毛が増える。円板の極めて多いのは  $-0.1^{\circ}\text{C}$  以上で、 $-2.5^{\circ}\text{C}$  以下では円板は発生していない。筆者等の蒸溜水及び水道水で初期結晶の現れる水温は、 $-0.4^{\circ}\text{C}$  以下であるから円板の発生が極めて少なかった事は荒川の観察と一致する。

荒川の報告<sup>5)</sup>で、水底より冷却した場合には水温  $-2.5^{\circ}\text{C}$  以下でも円板が発生している。筆者等の観察では海水の氷晶は水面でなく水中に発生した様に見えたが、円板が出来るためには氷晶と水の間に相対運動がある事が条件の一つであると考えられる。

エッチピットについては今回はまだ系統的に観察していないので、これによる結晶軸の方向についての詳報は次報以下にゆずりたいと思う。今迄に判つた所では、六花は C 軸が水面に垂直である事は予想通りであつたが、羽毛の弧の内側の格子状の部分も、外側の樹枝状の部分と同様に C 軸が水面にほぼ垂直 (図版 VII, A, B, C, E, H の部分) であつたのは意外で今後の宿題の一つであると考え。海水の場合にエッチピットが出来なかつたのは、水槽からとり出した後も表面がブラインで覆われてしめつていた為であろうと思われる。

以上で今回の報告を終るが、残された多くの問題点については今後更に検討を加え後報で報告する。又今後は垂直方向の成長について研究を進めてゆくつもりである。

なおこの実験にあたって、田畑忠司氏及び樋口敬二氏に数々の御指導と御助言をいただいた事を深く感謝する。

#### 文 献

- 1) 田畑忠司, 小野延雄 1957 海水の構造について. 低温科学, 物理篇, **16**, 197.
- 2) 福富孝治, 長島富雄, 楠 宏 1949 海水の研究 (第2報). 氷晶の生成と氷殻の組織とについて (I). 低温科学, **2**, 73.
- 3) Arakawa, K. and K. Higuchi 1952 Studies on the freezing of water (I). J. Fac. Sci., Hokkaido Univ. Ser. II, **4**, 201.
- 4) Kumai, M. and K. Itagaki 1953 Cinematographic study of ice crystal formation in water. J. Fac. Sci., Hokkaido Univ. Ser. II, **4**, 237.
- 5) Arakawa, K. 1954 Studies on the freezing of water (II). J. Fac. Sci., Hokkaido Univ. Ser. II, **4** 311.
- 6) 荒川淳, 樋口敬二 1954 水溶液の凍結現象. 低温科学, 物理篇, **12**, 73.
- 7) Arakawa, K. 1955 The growth of ice crystals in water. J. Glaciology, **2**, 463.
- 8) Breitner, H. J. 1953 Entmischung beim Gefrieren wasseriger Lösungen. Deutsch. Hydrogr. Zeit., **6**, 80.
- 9) 鈴木義男 1955 海面上にできる氷晶の観察. 低温科学, 物理篇, **14**, 151.
- 10) Higuchi, K. and J. Muguruma 1958 Etching of ice crystals by the use of plastic replica film. J. Fac. Sci., Hokkaido Univ. Ser. VII, **1**, 81.
- 11) 日本海洋学会 1955 海洋観測常用表. 86.

#### Résumé

A series of freezing experiments was carried out in order to study the process of the ice rind formation. In each experiment, about 500 cc of water (sea water of chlorinity 18.01‰, city water and distilled water) contained in a  $15 \times 15 \times 6$  cm<sup>3</sup> tray with a glass panel bottom was frozen in a cold room without any artificial seeding. Air temperature of the room was almost constant during each experiment but varied from experiment to experiment between  $-12^{\circ}\text{C}$  and  $-18^{\circ}\text{C}$ .

The first ice crystal or crystals always appeared off the wall of the tray. As water surface was not protected from tiny fragments of hoar falling from the ceiling of the room, it was very probable that they may have acted as freezing nuclei.

Water temperatures at the appearance of ice crystals were  $-2.8 \sim -2.9^{\circ}\text{C}$  for sea water (8),  $-0.4 \sim -1.8^{\circ}\text{C}$  for city water (4) and  $-0.6 \sim -1.8^{\circ}\text{C}$  for distilled water (5). (Figures in parentheses mean the number of experiments performed).

Successive stages of ice growth were shadow-photographed<sup>3),7)</sup> until the surface was completely covered by ice 2~3 mm thick. Then, the formed ice rind was taken out and the etching method<sup>10)</sup> was applied to study its crystal structure. On the surface of sea ice, however, etch pits could not be obtained, suggesting that the surface of sea ice was probably coated by a thin film of brine.

Plates I-II, III-IV and V-VI are examples of shadow photographs in case of sea

water, city water and distilled water, respectively. Micro-photographs of etch pits produced on the surface of the ice rind, whose initial stages are shown in Pl. V-VI, are given in Pl. VII. Photographs in Pl. VIII show the discoidal ice crystals which appeared in distilled water when the latter was stirred with a cooled glass bar and (13) their later stage of growth (14).

Numbers and habits of ice crystals and their modes of growth can be investigated from these photographs. Concerning crystal habits, results obtained here are in good agreement with those by other researchers.<sup>3),4)5)</sup>

Systematic studies on the dependence of above mentioned factors (number, habit and mode of growth) on the grade of supercooling, the rate of cooling, the composition and concentration of solutes, etc. are now in progress and shall be reported in forthcoming papers.

図 版 説 明

実験番号 (11), 海水, 気温  $-18.0^{\circ}\text{C}$ , 氷晶の認められた時の水温  $-2.8^{\circ}\text{C}$ 。

- I-1 氷晶の認められた瞬間
- I-2 それより2分後
- II-3 それより5分後
- II-4 それより8分後

実験番号 (10) 水道水, 気温  $-18.0^{\circ}\text{C}$ , 氷晶の認められた時の水温  $-0.5^{\circ}\text{C}$ 。

- III-5 氷晶が認められてから3分後
- III-6 氷晶が認められてから4分後
- IV-7 氷晶が認められてから5分後
- IV-8 氷晶が認められてから6分後

実験番号 (17) 蒸留水, 気温  $-16.2^{\circ}\text{C}$ , 氷晶の認められた時の水温  $-1.0^{\circ}\text{C}$ 。

- V-9 氷晶が認められてから1分後
- V-10 氷晶が認められてから3分後
- VI-11 氷晶が認められてから6分後
- VI-12 氷晶が認められてから8分後
- VI-13 できた氷殻の見取図
- VII-14 対応する各部の表面のエッチピット

実験番号 (4) 蒸留水, 気温  $-17.2^{\circ}\text{C}$ , 水温  $-1.3^{\circ}\text{C}$ 。

- VIII-15 水をかくはんした時にできた円板結晶
- IX-16 それより1分後

(影写真はいずれも実物大, エッチピットは13倍である)。



