



HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	海氷生長と海氷からのブラインの排出に関する実験
Author(s)	若土, 正暁; WAKATSUCHI, Masaaki
Citation	低温科学. 物理篇, 32, 195-205
Issue Date	1974-03-31
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/18257
Type	departmental bulletin paper
File Information	32_p195-205.pdf



海水生長と海水からのブラインの排出に関する実験*

若 土 正 暁
(低温科学研究所)
(昭和49年10月受理)

I. ま え が き

北極や南極のように極地方の海では、大気からの冷却によって海表面が結氷し、海水が生長する。海水の塩分は、海水のその数の数分の一にすぎず、海水が生長していく過程で、余剰の塩分が濃塩分のブラインとして海水から排出され、海水下の海水の塩分を増加させる。このブラインは、もとの海水より低温・高塩分であり、従って密度も大きい。それ故、排出されたブラインは沈降して塩対流を起こす。

この海水生長過程に於ける海水下の対流は、それが海水の鉛直混合、水塊形成といった海洋学的に極めて重要な問題を含んだ現象であるにもかかわらず、これについての研究は、2, 3の観測^{1)~3)}・実験^{4),5)}を除いてほとんどなく、定量的にはもちろんのこと、定性的にもまだまだ未知の点が多い。

そこで著者は、これらの現象を解明していく第一歩として、生成直後の海水生長と、それにもなると起こるブラインの排出についての測定を低温実験室の中で行なった。

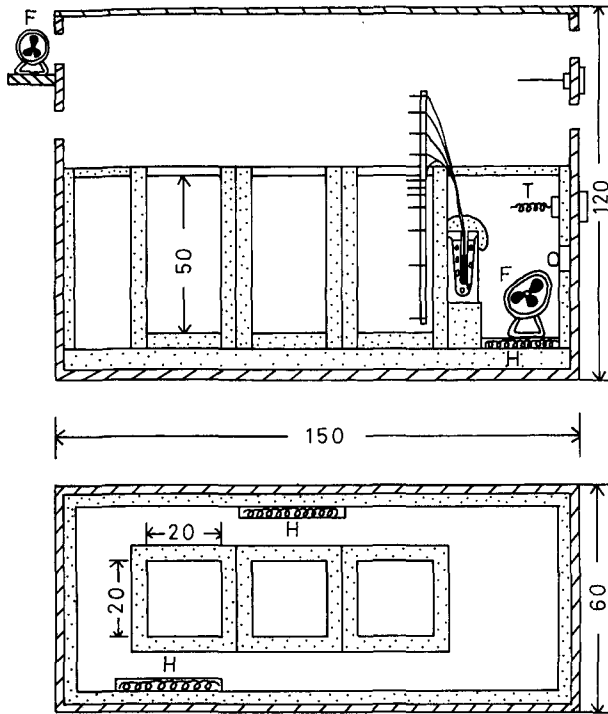
海水生長の過程のうちで、特に生成直後に注目した理由は、この段階に於けるブラインの排出が、海水下の海水の場に大きな影響を与えていると最近注目を浴びているにもかかわらず、実際の観測が極めて困難なため、今までに観測事実が全くないという事のためである。従って、室内実験ではあるが、海水の生長速度については、天然で起こっている条件の範囲内で行なった。

II. 実 験 方 法

実験装置を第1図に示した。水槽は内径20×20×53 cm、厚さ1 cmの透明なアクリル板製で、3個同時に使った。また中に入れた海水は天然のもので、塩分量32.88~34.81%であった。水槽の周囲はすべて断熱材で覆い、さらにその周囲の空間を用いた海水の結氷温度である約-1.9°Cに維持した。さらに、3個の水槽の上の状態が同じになるように、小型扇風機で一定の風を吹かせた。但し、風は弱く(約1.5 m/sec)、水面に波が立つという事はなかった。

温度の測定には、銅-コンスタンタンの熱電対を用いた。水温は、水面下1, 2, 3, 5, 8 cmの温度を常時測定記録し、その他20, 45 cmの温度も随時記録するようにした。また気温は、水面上0.5, 1, 1.5, 2, 5, 10 cmのところまで記録したが、時間的・空間的に変動が少なく、最も

* 北海道大学低温科学研究所業績 第1342号



第1図 実験装置図。F; 扇風機, H; ヒーター, T; サーモスタット。数字の単位は cm

安定していたので、2 cm の温度を気温と定義した。実験では、この気温を -5°C から -30°C まで5度おきの6段階に変化させた。

実験にあたっては、3個の水槽にあらかじめ -0.8°C 位に冷却した海水を満たし、予定の気温下で冷却を開始した。水槽の冷却の状況、従ってすべての水槽の海水は全く同一であるとみなし、それぞれの水槽から次々に、厚さ 1.5, 3.0, 5.0 cm の海氷試料をとり出し、塩分量の測定および結晶構造の観測に用いた。すなわち、水槽の横から見て、水厚が 1.5 cm に達した時に、ある水槽から氷をとり出し、さらに水厚が 3.0 cm に達した時に、次の水槽から試料をとり出し、最後の水槽の中の氷の厚さが、5.0 cm になった時に、実験を

終了した。それまでに要した時間は、気温 -27°C のときに約 10 時間、 -6°C のときには約 45 時間であった。

海氷の水厚の増加は、水槽の横から目視で随時測定した。また海水の生長途上で、海水下の海水を、内径 1 mm、長さ 15 cm の細長い注射針を用いて採取し、塩分量の測定に用いた。

III. 測定結果及び議論

1. 水温記録の一例

-20°C の気温のときの海水下の水温変化の一例を第2図に示す。縦軸は表面から種々の深さにおける海水および海氷の温度、横軸は時間で、結氷を開始した時を時間の原点としている。また図の上部に示した棒グラフは、その時刻における氷の実質部分の厚さであり、棒グラフの下の数字は、後に述べる実質部分の下に形成された樹枝状結晶の厚さを示している。

この図を見てまず目につくことは、表面が結氷を開始した時点では、表面以深の水温はまだ -1°C 前後であるという事である。用いた海水の塩分量は 32.88‰ であったので、結氷温度は約 -1.82°C である。この海水の塩分量は 24.7‰ よりも多いので、静かに冷却していった場合、水槽全体がすべて結氷温度に達してから表面の結氷が始まることになる。ところが、このように表面以深がまだ結氷温度に達していないうちに表面が結氷を開始した原因として、今回の実験では冷却が急激であったために、冷却による対流が水槽内に発達するいとまがなかった

ために起こったものと考えられる。また表面下数 mm のところに温度計を置いてみても、やはりそこが結氷温度に達する前に表面は結氷を開始してしまった。

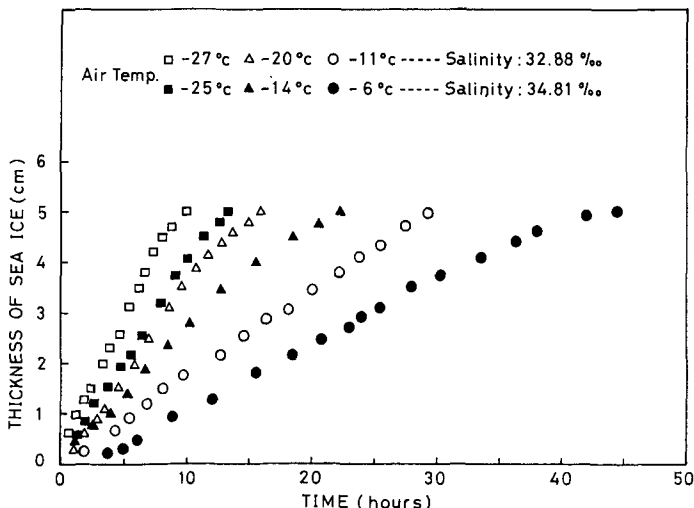
表層以深の水温は、ほぼ一様であり、氷厚の増加とともに、徐々に低下して、2, 3 時間で結氷温度に達している。また温度計が氷中にとり込まれると、その指示温度が急激に下がり始めるので、温度計が氷厚増加によって次々に氷の中にとり込まれていく様子がよくわかる。

2. 氷厚増加の割合

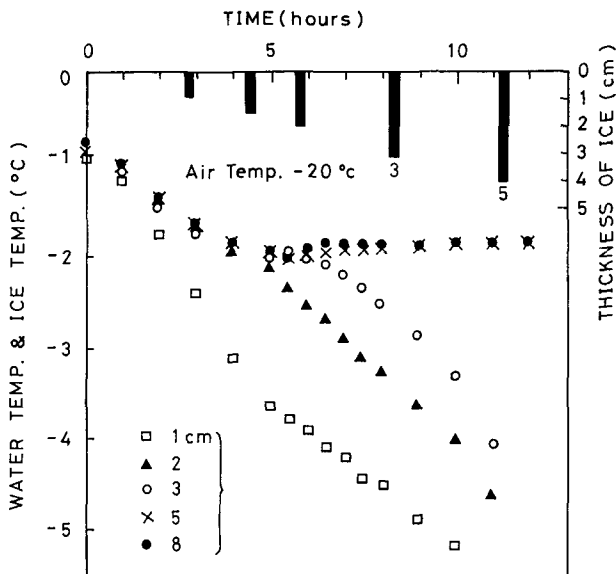
風速一定のもと、気温変化によって、氷厚増加の割合がどのように変化していくかを示したのが

第3図である。横軸は時間で、縦軸は氷の厚さである。白印と黒印では、用いた海水の塩分量が少し異なっている。氷厚増加の割合は、厚さが4 cm ぐらいまではほぼ直線的であるが、その後はこれから外れる傾向が現われている。また当然であるが、気温が低くなるに従って氷厚増加の割合は大きくなるという傾向が現われている。

第3図から、厚さ4 cm ぐらいまでは、氷の厚さは積算寒度にはほぼ比例して増加している



第3図 気温変化による氷厚増加の割合



第2図 水温及び氷温の時間変化。気温-20°C。温度は、水面及び氷表面からの各深さのところ測定。棒グラフは、その時刻における氷の厚さを示し、その下の数字は樹枝状の氷の厚さを示す。

という事がわかる。この結果は、氷厚が積算寒度の平方根に比例して増加するという Stefan の理論式とは合わないが、福富⁶⁾他や Assur and Weeks⁷⁾ が、天然の海水の厚さの増加を観測した時にも、氷の厚さが薄い段階では、両者がほぼ直線的な関係にあるという同様の結果を得ている。その理由として、新しく生成したばかりの塩分の多い海水では、氷厚増加係数が

著しく小さいことを挙げているが、筆者の場合も、まさにそれに該当する。

また第3図から氷厚増加速度を次のようにして求めた。すなわち、氷厚が1.5 cm になるまでの各点を通る最も適当な直線を引き、その直線と時間軸との交点を結氷開始の時刻とし、この結氷開始時から氷厚がそれぞれ1.5 cm, 3.0 cm および5.0 cm になるまでの平均の氷厚増加速度を求めて、それぞれの厚さに達するまでの氷厚増加速度とした。

そこで次に、この氷厚増加速度と海水からの塩の排出との関係について調べた。

3. 海水生長と海水からの塩の排出

第3図のように積算寒度にはほぼ比例して厚さを増していった海水は、その生長過程で濃縮なブラインとして塩を海水下へ排出する。海水の塩分量の測定結果を第1表にまとめた。

表では、採取した海水試料の融解水について、銀滴定法によって求めた塩素量をCoxの公式を用いて塩分量に換算した結果を示してある。例えば、塩分量が32.88%の海水を、気温 -11°C で凍らせていった時に生成した厚さ1.5 cmの海水の平均塩分量は16.60%であった。

塩分量比 S_i/S_w , S_i/S というのは、それぞれ海水を採り出した後に残った海水、及び結氷を開始する前の海水に対する海水の平均塩分量比である。この平均塩分量比と氷厚増加速度との関係は第4図のようになる。図では、海水の厚さがそれぞれ1.5 cm, 3.0 cm および5.0 cm に達した時の海水の塩分量の元の海水の塩分量に対する比を示してある。図から氷厚増加速度が大きくなるに従って海水と海水の塩分量比、つまり海水の平均塩分量は、ほぼ直線的に増加していく傾向にあることがわかる。ところが、その増加の割合は厚さが増すに従って小さくなる。

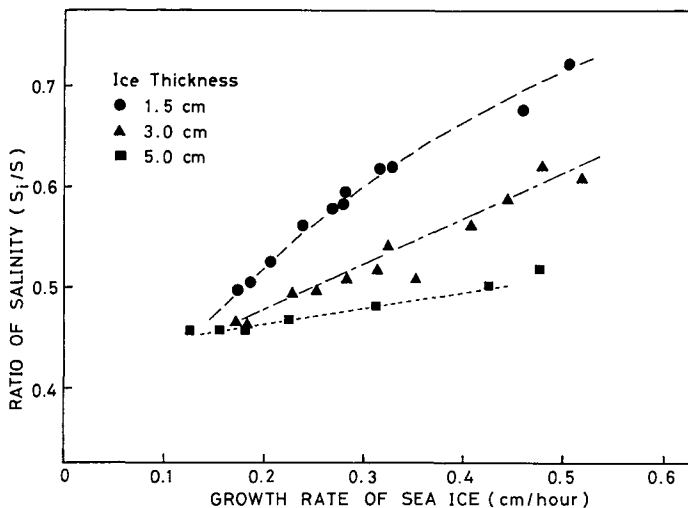
第1表 海水の塩分量と氷厚増加速度

$S=32.88\%$ の場合

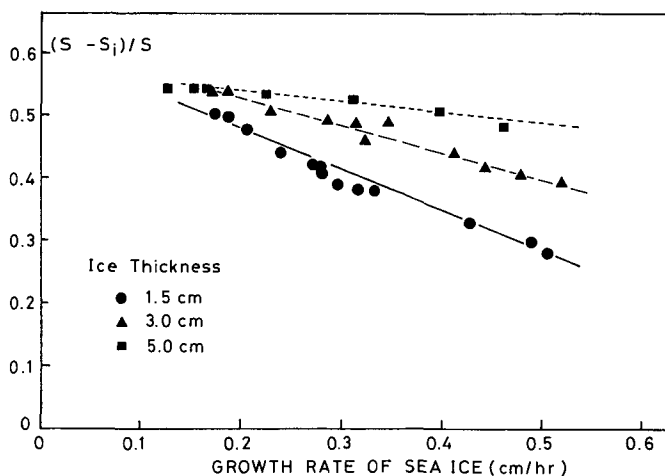
氷 厚 気 温	1.5 cm			3.0 cm			5.0 cm		
	-11°C	-20°C	-27°C	-11°C	-20°C	-27°C	-11°C	-20°C	-27°C
海 水 (S_i)	16.60	20.41	23.77	15.35	16.76	19.70	15.23	15.70	17.20
残り海水 (S_w)	34.16	33.86	33.91	34.81	34.72	34.54	36.74	36.35	36.08
海 水 直 下	34.33	34.40	34.65	35.75	34.67	36.56	37.28	36.58	36.56
S_i/S_w	0.486	0.603	0.701	0.441	0.483	0.570	0.415	0.432	0.477
S_i/S	0.505	0.621	0.723	0.467	0.510	0.599	0.463	0.477	0.523
氷厚増加速度 (cm/hour)	0.188	0.326	0.506	0.172	0.349	0.480	0.165	0.312	0.462

$S=34.81\%$ の場合

氷 厚 気 温	1.5 cm		3.0 cm		5.0 cm		
	-14°C	-25°C	-14°C	-25°C	-6°C	-14°C	-25°C
海 水 (S_i)	19.65	23.40	17.29	19.61	16.04	16.31	17.30
残り海水 (S_w)	36.71	35.90	37.68	37.05	38.42	38.42	38.13
海 水 直 下	36.94	35.70	38.05	37.23	—	—	38.66
S_i/S_w	0.535	0.652	0.459	0.529	0.417	0.425	0.454
S_i/S	0.564	0.672	0.497	0.563	0.461	0.469	0.497
氷厚増加速度 (cm/hour)	0.221	0.428	0.250	0.414	0.127	0.225	0.400



第4図 氷厚増加速度と海水の塩分量との関係



第5図 氷厚増加速度と塩の排出率との関係

ところで、海水の生長過程でブラインとなって海水からしぼり出される塩の割合は、第4図とは逆の関係にあり第5図のようになる。すなわち、海水がある厚さに達するまでに海水から排出される塩の量は、海水の生長速度が小さい程多いが、この傾向は氷が厚くなると弱まってくる。第4図や第5図のような結果を引き起こす原因を追求する一つの方法として、次に海水の結晶構造を調べた。

4. 海水の結晶構造

実験で採取した海水の結晶構造の一例を第6図に示す。A, B, Cは、気温がそれぞれ -11°C 、 -20°C および -27°C の時に形成された海水の表面から深さ2.2 cmのところの水平断面の偏光写真である。一見して明らかであるが、氷厚増加速度が大きくなる程、光学的単結晶の平均的な大きさは小さくなっている。また氷表面から深さによる結晶粒の大きさの違いは、

厚さが5 cm までにはほとんどなかった。これら単結晶の平均的な大きさ、及び海水の塩分量と氷厚増加速度との関係は第7図のようになる。

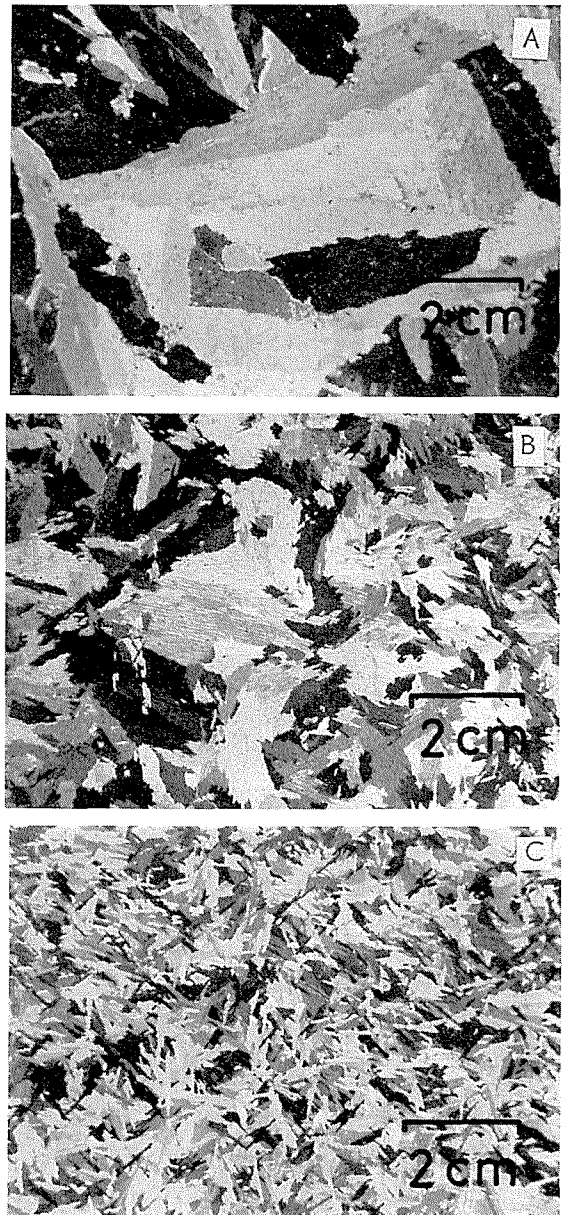
この図から、氷厚増加速度が大きくなる程海水の単結晶の大きさは、急激に小さくなり、逆に海水の平均塩分量は、ほぼ直線的に増大することが明らかである。

以上のように、氷厚増加速度、海水の結晶構造、海水の塩分量の三者が、今回の測定範囲内では、ほぼ直線的な関係にあり、しかもその変化の割合が非常に大きいという事は、注目に値する。従って、氷厚増加速度がこの範囲内では、海水生長過程に於ける海水下の水の場合は、氷厚増加速度によって大きく左右されるであろう事が予想される。

5. 海水下の水温・塩分量分布と樹枝状氷の形成

この実験のように、塩分量が24.7‰以上の海水を冷却・凍結させた場合には最大密度に達する温度が、その結氷温度より低いので、表面が結氷を開始するときには、水槽全体が一様に結氷温度になるはずである。ところがこの実験では、すでに述べたように水槽全体の水温が、ほぼ -1°C のときに、既に表面が結氷し始め、海水の生長とともに水温もその結氷温度まで下った。

生長しつつある海水の底面は、ほぼ平らであったが、実験中に海水の実質部分の下に、第8図のようなもやもやとした氷が、突如として飛び出してきたことがあった。これは、気温が -11°C の時の例であり、これを採り出して拡大した写真が第9図である。このもやもやした氷は、図のように実質部分の下にいろんな方向に伸びた樹枝状氷の一つの枝のような形をした薄い板状の氷であることがわかった。そこで、今後この板状の氷を樹枝状氷と呼ぶことにする。

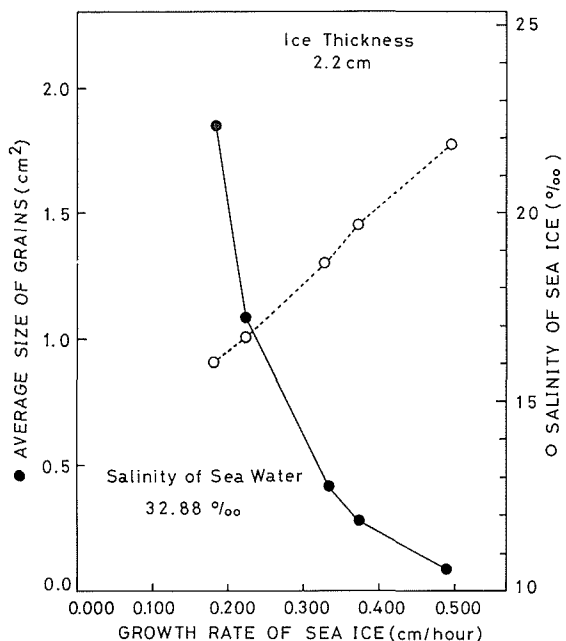


第6図 海水の水平断面(氷厚2.2 cm)

A; 氷厚増加速度 0.185 cm/hr (気温 -11°C)

B; 同 0.328 cm/hr (気温 -20°C)

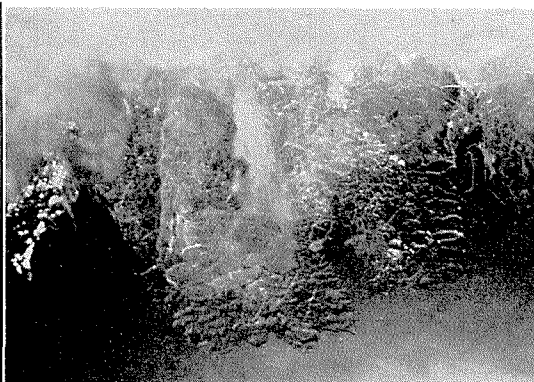
C; 同 0.489 cm/hr (気温 -27°C)



第7図 氷厚増加速度による海水の結晶構造および海水の塩分量の関係。結晶構造は表面から深さ2.2 cm ところの水平断面。海水の塩分量は厚さ2.2 cm の海水の平均塩分量

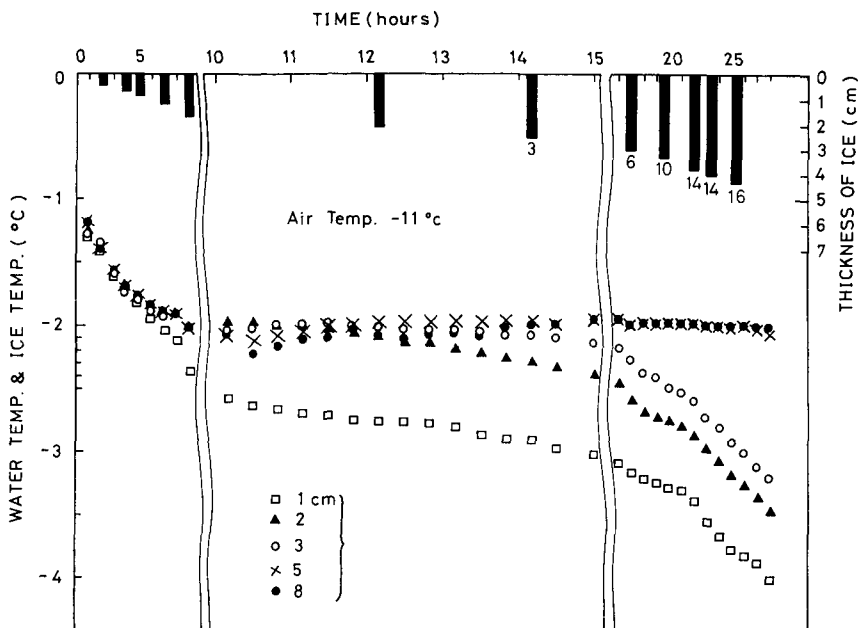


第8図 水槽内に形成された実質部分の氷および樹枝状氷の一例。水槽の左側に示したスケールは2 cm 間隔

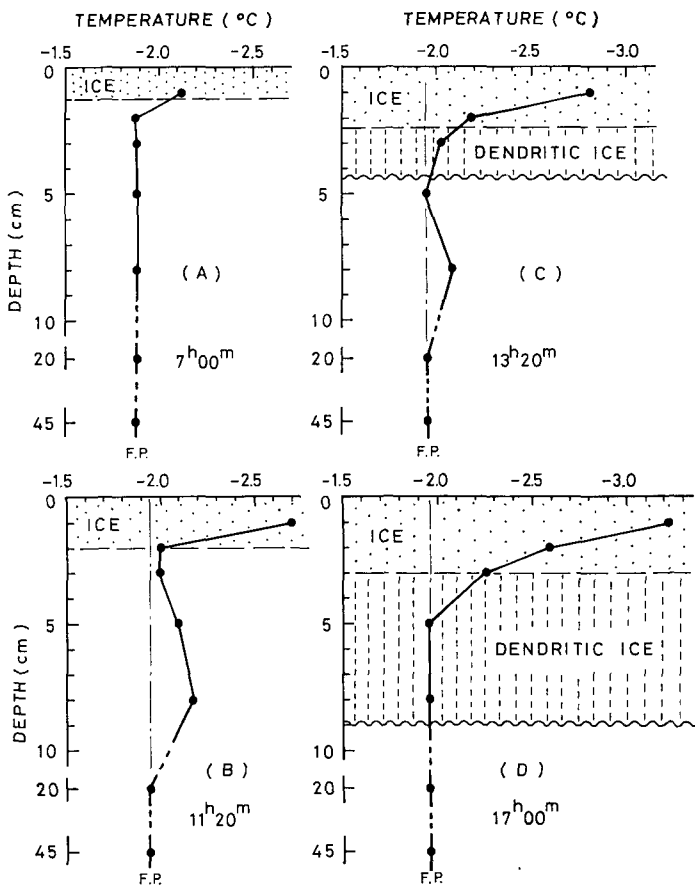


第9図 樹枝状氷を採り出して拡大したもの

この樹枝状氷が形成された時の海水下の水温記録を第10図に、また形成される前後の水温の鉛直分布を第11図に示す。この例では、気温は -11°C であった。表面が結氷を開始した時点では、水面下1 cm~8 cm の温度はすべてほぼ -1°C であり、さらに冷却がすすむにつれて、水槽全体の温度が徐々に結氷温度まで下っていく。氷厚が1 cm になったところで深さ1 cm の温度計は水中に入ってしまうので、その後急激に温度が下っていくが、他の5本の温度計はほとんど結氷温度である(第11図(A))。ところが氷厚が1.7 cm になったときに、今まで



第10図 気温-11°Cの時の水温および氷厚記録



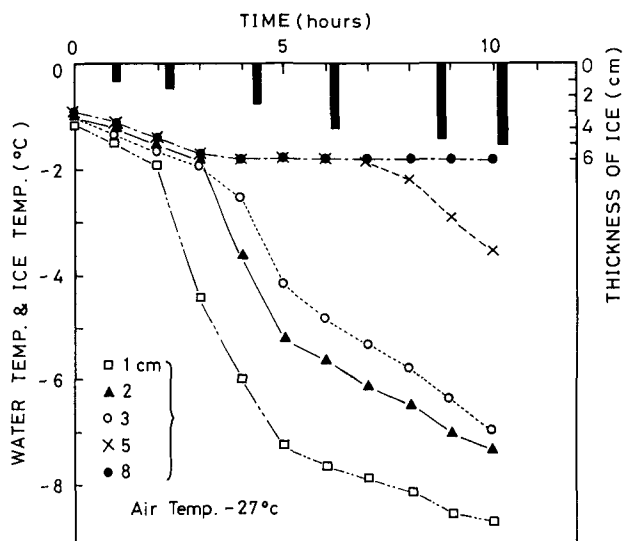
第11図 樹枝状氷が形成される前後の海水下の水温の鉛直分布。点をほどこした部分が、実質部分の氷で破線をほどこした部分が樹枝状氷である。図に示した時間は結氷開始からの時間で時間経過としては(A)(B)(C)(D)の順番になっている。F.P.は結氷温度。気温は-11°C

水の下面から底まで一様であった水温分布が突如としてくずれ、氷から最も近い深さ 2 cm の温度が高く (-1.97°C)、氷から最も遠く離れた深さ 8 cm の温度が最も低い (約 -2.16°C) という状態が生じ (第 11 図 (B))、この状態が約 2 時間半も続いた。この時の水槽内の海水の塩分量の鉛直分布は、深さが、3, 5, 8, 20 および 42 cm のところで、それぞれ 34.8, 34.3, 34.4, 34.3, 34.5‰ と深さが 3 cm のところ以外は、ほぼ一定であり、また塩分量の水平分布は、深さ 5 cm および 20 cm のところで、それぞれ 4 カ所測定したが全く一様であった。これらの塩分量の海水の結氷温度は、約 -1.92°C である。それゆえ深さ 5~8 cm の海水はあきらかに過冷却状態であった。この時の氷厚は 2.1 cm である。その後約 2 時間を経て、氷厚が 2.5 cm になったときに、2 cm 以上の深さにわたって樹枝状氷が突如として形成され、過冷却状態はほぼ消滅した (第 11 図 (C))。その後は、実質部分の氷厚の増加とともに、樹枝状氷の部分も増加して第 11 図 (D) の状態になった。第 10 図、第 11 図に示したような過冷却状態は、生長中の海氷から排出された低温高塩分のブラインによって形成されたとしか考えられない。第 11 図 (A) (結氷開始後 7 時間) の時の氷温に比べて (B) (11 時間 20 分後) の氷温の方がかなり低く、またこの例のように氷厚増加速度が小さい時には、第 5 図で示したように塩の排出率が高い。それゆえ (A) から (B) までの時間経過の間に、海氷から温度の低い密度の大きいブラインがかなりの量排出されたものと考えられる。この温度の低いブラインは、糸状に落下していきながら⁴⁾、周囲の海水を冷却した結果、深さ 5~8 cm あたりを過冷却状態に陥し入れたものと考えられる。そしてこの過冷却状態は、樹枝状氷の形成によって消滅してしまったと考える。

この例のように、氷厚増加速度の小さい場合は樹枝状氷が形成されたが、増加速度が大きくなるにつれて出来にくくなり、気温が -27°C の時は全く見られなかった。そこでその時の水温記録を第 12 図に示す。この時も表面が結氷を開始した時点では、表面以深はほぼ -1°C であったが、その後冷却が進むにつれて結氷温度まで下っていくが、その間の深さによる水温は一様でなく、わずかの勾配をもっていた。そしてほどなく水槽全体が結氷温度に達し、それ以後も過冷却状態は見られず、一様に結氷温度が続くという至って単純な水温分布になっている。

氷厚増加速度が大きい場合、氷下面より離れたところに過冷却層が形成されないのは、ブラインの排出率が低いという事によるのかもしれない。

以上の海氷生長過程に於ける海氷下の諸現象については、シュリーレン法を用いて現在観測中である。



第 12 図 気温 -27°C のときの水温および氷温記録

IV. 結 論

海氷の生長初期における以上の実験から明らかになった事は次のとおりである。

1. 水槽内で、結氷温度が約 -1.85°C の海水を凍結させたこの実験では、水槽内の水が約 -1°C のときにその表面で結氷が始まった。
2. 風速一定、気温変化のみによる海氷生長初期の段階では、氷厚は積算寒度にはほぼ比例して増加するとみなすことができる。
3. 海水からの塩の排出率は、氷厚増加速度が大きくなるに従って、ほぼ直線的に減少する。しかし厚さが増すと氷厚増加速度によらずほぼ一定となる。
4. 海水の単結晶一つ一つの大きさは、氷厚増加速度が大きくなるに従って急激に小さくなる。
5. したがって海水からの塩の排出率は結晶の大きさが大きい程高い。
6. 海水が生長していく過程で、特に氷厚増加速度があまり大きくないときに、海水直下より少し深いところに、時として過冷却層が形成する。この過冷却層は、樹枝状氷の形成によって消滅する。
7. 海氷生長によって、下の水の場が左右され、形成された水の場によって海氷の生長が影響を受けるといふ相互作用が明らかである。

おわりに、この研究を進めるにあたっては田畑教授をはじめ、当研究所のさまざまな人々の御協力を得たことを記し厚く感謝の意を表します。

文 献

- 1) Lewis, E. L. and Walker, E. R. 1970 The water structure under a growing sea ice sheet. *J. Geophys. Res.*, **75**, 6837-6845.
- 2) Lake, R. A. and Lewis, E. L. 1970 Salt rejection by sea ice during growth. *J. Geophys. Res.*, **75**, 583-597.
- 3) Lewis, E. L. and Lake, R. A. 1971 Sea ice and supercooled water. *J. Geophys. Res.*, **76**, 5836-5841.
- 4) Foster, T. D. 1969 Experiments on haline convection induced by freezing of sea water. *J. Geophys. Res.*, **74**, 6967-6974.
- 5) Bennington, K. O. 1963 Some crystal growth features of sea ice. *J. Glaciol.*, **4**, 669-688.
- 6) 福富孝治・楠 宏・田畑忠司 1950 海氷の研究 (第6報) 海氷の厚さの増加について. 低温科学, **3**, 171-186.
- 7) Assur, A. and Weeks, W. F. 1964 Growth, Structure, and strength of sea ice. *GRREL Res. Rept.*, **135**, 1-19.

Summary

To observe the rejection of brine from sea ice at the initial stage of growth, laboratory experiments on the unidirectional freezing of sea water from above was performed. Growth rates were controlled by varying the air temperature above the freezing apparatus every 5 degrees from -5°C to -30°C with a constant wind speed; the rates corresponded to naturally occurring conditions. Natural sea water was used; its salinity was about 33‰.

The results are summarized as follows:

- (1) The thickness of growing thin ice was proportional to the accumulated degree-hours.
- (2) The rate of brine rejection decreased linearly with the increase of the growth rate.
- (3) The average size of grains decreased exponentially with the increase of the growth rate.
- (4) The brine rejection was more predominant when the sizes of grains were larger, which implies that the rejection is influenced remarkably by the mode of the formation of crystals composing sea ice.
- (5) A layer of supercooled water was observed a little away from below the bottom surface of the growing sea ice, when the growth rate was small. It is believed that supercooling proceeded at this layer by the rejected brine falling downward. It was also observed that dendritic ice was suddenly formed extending from the bottom of the growing sea ice to this layer and the formation continued until supercooling diminished.

It was concluded that the growth of sea ice had remarkable interactions with the underlying sea water.