



Title	海氷の構造について
Author(s)	田畑, 忠司; TABATA, Tadashi; 小野, 延雄 他
Citation	低温科学. 物理篇, 16, 197-210
Issue Date	1957-12-13
Doc URL	<a href="https://hdl.handle.net/2115/17935">https://hdl.handle.net/2115/17935</a>
Type	departmental bulletin paper
File Information	16_p197-210.pdf



## 海水の構造について

田畑忠司 小野延雄

(低温科学研究所 海洋学部門)

(昭和32年7月受理)

### まえがき

海水が凍結して出来た氷は淡水氷よりも強度や弾性率が可成り小さく<sup>1)</sup>硬さも小さい。これは海水の構造が淡水氷のそれと非常に違うことによるのは勿論である。一見した所でも、淡水氷の表面及び裏面は滑らかで切り出した氷は透明乃至は半透明であるのに対して、海水の裏面には写真1に示した様なモザイク状の模様が見られる。この模様は海水に特有なもので結晶構造の特徴があらわれたものであることは以前から指摘されていたが<sup>2)</sup>、海水の内部の構造はあまり観察されていない。また海水は厚さが数 cm の時は半透明で上から見ても写真1の様な模様が見えることが多いが、5~10 cm の厚さになると殆んど不透明で時には白く見え、それ以上の厚さではほとんど白く見える。写真1に示した様な海水の裏面の模様は、その氷の生成の条件即ち海水の塩分、冷却速度(成長速度)によつて違ふ様であり、したがつて内部構造もいくらかは異なるであろうし、生成後の気象及び海洋の条件の変化によつてもいくらかは変化するのである。したがつて海水の構造の観察はその氷の歴史を知るために有力な手がかりになり得るかもしれないし、又海水の物理的及び化学的諸性質の研究の際には欠くべからざるものと思われる。

いろいろの条件のもとで出来た海水の構造及び一般的な海水の構造を知るために、1956年2月と1957年2月及び3月に北海道沿岸及び沖合で種々の厚さの海水を採取し、それらの内部の brine 細胞もしくは気泡及び結晶構造を観察比較したのでその結果について報告する。なお、採取した海水はポリエチレンの袋に入れて密封して低温実験室(約 $-10^{\circ}\text{C}$ )に保存し、内部構造の観察も同じ室内で行なつた。

### I. 観察の方法

内部構造の観察を容易にするために、結氷板から切り出した氷塊又は core drill<sup>3)</sup>で切り出した core (直径約 6 cm) の観察しようとする部分から厚さ 5~10 mm, 幅 6~8 cm, 長さ 10~30 cm の氷板を電動鋸で切り出した。更にこの氷板を手鉋(この目的のために特に製作した大型のもの)で 0.6~0.8 mm の厚さになるまで削つて観察用の試料とした。氷板をこの程度の

\* 北海道大学低温科学研究所業績 第 378 号

厚さまで削ることはあまり困難ではないが、削っているうちに氷から brine が滲出して氷が匏台に密着することが屢々あつた。そのため削り終つた試料を匏台から離すことが可成り困難でしかもその時に氷が欠けることがあつたのは欠点である。結晶光学的観察のためにはもつとすい試料の方が望ましいし、この方法で更にうすくまで削ることは可能であるが、削り終つた試料を台から離すことが殆んど不可能であつた。又削り終つた氷を低温室内に露出させて放置すると昇華のために次第に薄くなるが、辺縁部がうすくなり易いので観察にはあまり具合良くなかつた。尚 brine 細胞のみを観察するには 5~10 mm 位の厚さの試料でも充分である。

このうすく削つた試料を、brine 細胞および気泡を観察する時には散乱した透過光を下からあてて写真をとつた。結晶構造の観察の際は同じ光源を用いて氷の下に偏光板をおき、写真機のレンズにも偏光板をとりつけて、それらの偏光方向が互に直角になる様にして写真をとつた。

のちに示す様に、海水は結晶の主軸が水平面内でのいろいろの方向を向いた単結晶の集合体である。それらの各単結晶の結晶主軸の間の交角を知るために Universal Stage を用いた。この Universal Stage はほぼ 5cm×7cm の大きさの氷を写真 2 に示した様な載物台に固定して  $x, y, z$  の 3 軸のまわりに廻転して観察することが出来る。冬季野外で用うる時には反射鏡によつて太陽光線を光源として用うる。

## II. 海水のモザイク構造および Brine 細胞

海水の裏面には写真 1 に示した様なモザイク状の模様が見えるが、一般に成長の過程にある海水の下面には殆んど凹凸が見られないのが普通である。然し極めて稀にはあるが、氷の下面から樹枝状の構造をもつたうすい板状結晶が異常成長をすることがある。写真 3 は厚さ約 27 cm の海水の下面に異常成長をした板状の薄片を横（水平方向）から見た写真である。この薄片の一つ一つは厚さが 0.1~0.3 mm 位の氷が 2, 3 枚ずつ重なりあつたものであり、全体として厚さは 1 mm にも達しないことが多い。写真 1 は同じ氷を結氷の下の方から見たものである。この様に結晶が海水の下面から局部的に異常成長することは極めて珍しいことである。異常に成長した部分はうねりや潮汐による海水と氷の相対運動及びその他の原因によつて破壊するかもしくは融解して間もなく氷の下面は再び平らになる。

写真 1 及び 3 からわかる様に、氷の下面に見られるモザイク状の模様はほぼ鉛直に成長したうすい結晶板の切り口である。この結晶板（短冊状薄片）の切り口は結氷の底面ばかりでなく、結氷の内部の水平に切つた断面でも認めることが出来る（写真 4）。又写真 5 に同じ氷の表面からいろいろの距離の水平断面の写真を示した。これらの写真から海水は短冊状薄片の一枚一枚が下の方に伸びて行くことによつて厚さが増して行くことがわかる。しかもこの短冊状の薄片は何枚かが平行にならんで一つの集塊を作っている。そのとなりの集塊でも何枚かの薄片が平行にならんでいるがその方向が集塊毎に異なつているのが観察される。以上のことはここに示した例に限らずすべての海水に共通であり、所謂モザイク構造とも云うべき特有な構造である。

写真 1 で白く見える所は短冊状結晶薄片の切り口で黒く見える所は海水もしくは brine で

ある。結氷の下面では氷の温度は海水の結氷温度にほぼ等しく(海水の塩分によつて異なるが大凡  $-1.5 \sim -1.9^{\circ}\text{C}$ )、その程度の温度では液体の部分は結氷の全体積の約 40% を占めることが知られている<sup>7)</sup>。海水が次第に成長して行くところの海水は濃縮されて brine として氷中に閉ぢ込められる。これは brine 細胞と呼ばれる。

brine 細胞 (cell) の形状は従来から管状(結氷の上下方向に長い)ものと球形のものがあると考えられていたが、観察の結果写真 6 に示す様に管状、球形、不定形の 3 種類が認められた。しかしこれらの形状とそれらが出来る条件との関係は良くわからない。又筆者等の観察の方法では観察された細胞が、brine 細胞か又は気泡であるかはよくわからない。氷中におけるこれらの 3 種類の brine 細胞もしくは気泡の分布の様子はのちに示す種々の海水の垂直断面及び水平断面の透過光による写真から知ることが出来る。

brine はその位置の氷の温度を結氷温度とする濃度を呈しているものと考えることが出来る。所で結氷の表面はほぼ気温に等しいが、下面は常に海水の結氷温度に近いので結氷の内部には可成りの温度の勾配がある。したがつて表面近くの氷温の低い部分の brine は濃度が高い筈である。気温の日変化などにつれて氷の表面の温度も変化するので氷の内部の温度の勾配は常に変動する。又氷の厚さの増加につれても同様に温度の傾斜が変る。このために結氷中のある点における温度は決して一定ではなく表面に近い程大きく変化する。即ち、brine は氷中のこの温度変化につれてその濃度及びそれに伴つて体積が変るのである。但し brine が存在するのは海水に溶解している塩類の飽和溶液の結氷温度(約  $-21^{\circ}\text{C}$ )より氷温が高い場合に限るのは勿論であり、氷の温度が下つた時には brine から氷が析出し、逆の場合には氷が融解してその濃度が低くなる。

brine 細胞が管状をなしていると、結氷の表面の温度が下つた時には brine 細胞の表面に近い部分では氷の生成による体積の膨脹のために brine に圧力がかかつて下の方に押しやられその一部は結氷の外に押し出される。表面の温度が上昇すると表面に近い方で氷が融けて体積が減少するために brine 細胞は負の圧力になり、下の方から空気もしくは brine を吸い込み、時には結氷の下の海水を吸い上げる。独立している brine 細胞では、結氷の表面の温度が下ると細胞の上の方の部分で氷を析出するので brine の濃度が高くなり、未だ温度が変化していない下の部分の氷を融解する。その結果 brine 細胞は徐々に下の方に移動する<sup>8)</sup>。逆に表面の温度が上ると brine 細胞は上の方に移動する。しかも氷の内部には stress が加わる。即ち氷中の温度変化に応じて結氷の内部には常に stress が加わると同時に brine は温度の高い方に移動することになる。又このために氷中の塩分分布が変化する。Whitman<sup>6)</sup> は海水に人工的に温度変化を与えて brine の移動の結果として生じた氷中の塩分分布の変化を測定してこれを確めている。

海水の構造上の特徴は以上に述べた様に、海水が短冊状結晶の薄片の集合として生長して行くことと、brine が含まれて所謂 brine 細胞を形作つていることである。しかも氷の内部の温度変化に応じて氷の内部でも常に凍結融解が起り、その結果 brine の温度の高い方への移動

が行なわれる。即ち brine 細胞したがって水中の塩分分布が氷の温度と共に変化していることである。又 brine のほかに、可成りの量の空気もしくはガスを含んでいることも知られている<sup>7)</sup>。

この様に brine 細胞は温度と共に変化する。しかるに結氷板から観察のために切り出した氷板の温度は自然の場合と異なるばかりでなく、採取の際に brine の一部が流下するので、筆者等の観察した brine 細胞と自然の状態の時のそれとはいくらか異なっているのは当然であるが止むを得ない。しかし大凡の様子を知るには差支えないであろう。

### III. 典型的な海水の結晶構造

モザイク状の構造を形作っている短冊状の結晶薄片を取り出して偏光のもとで観察した結果、その結晶は一軸性結晶で結晶の主軸 ( $c$  軸) は鉛直に立っている広い面に対して垂直であることが確められた。即ち  $c$  軸は結氷面にはほぼ平行で、個々の薄片は  $a$  軸の方向に成長していることがわかった。例えば写真 4 において結晶の主軸は矢印の方向を向いていることになり、平行にならんでいる何枚かの薄片からなる氷塊は結晶光学的に同じ性質を示している。したがってこの試料を十字ニコルの視野におくと写真 7 に示す様に、氷片の厚さ、偏光面の方向及び  $c$  軸の向きによつて定まる個有な色模様が見られる。写真で濃淡の同じ所は結晶の主軸が同じ方向を向いている部分であり、写真 4 と対照すると、短冊状の結晶薄片の向きの同じ部分が同じ結晶光学的性質をもっていることが良くわかる。同じことは写真 5 及びその他の水平断面でも認められる。

次に短冊状の結晶薄片の集塊のいくつかを含む鉛直な断面の試料を作ると、 $c$  軸はこの試料の上下の方向に垂直な面内にあつてしかも試料とある角度をなしている。そのためこれを十字ニコルの視野におくと  $c$  軸と試料の傾きに応じて写真 8 に示した様な模様が見られる。写真で同じ濃さを呈する部分では互に平行な短冊状の結晶薄片から出来ている一つの氷塊が上下の方向に成長したことを示してをり、真黒な部分では  $c$  軸が紙面に対して垂直であることはいうまでもない。

写真 8 からわかる様に結晶光学的に同じ性質を示す部分 (便宜上 grain と呼ぶ) は必ずしも互に平行に成長していない。又始めに出来たすべての grain がそのまま成長するわけではなく、劣勢なものは途中で消滅して grain の平均の大きさが次第に大きくなる傾向にあることがわかる。このことは更に写真 5 に示した試料の偏光写真 (写真 9) の表面近くの水平断面 (9-1) と底面近くの水平断面 (9-4) を比較すると明らかである。

海水が凍結して出来た氷はこの様な結晶構造を示している。grain はいろいろの大きさのものが観察されたが、特に沿岸近くで凍結し移動することなく成長し (fast ice) 且つ、成長の過程で水温が常に結氷点に保たれ気温はそれ以下でしかも降雪が少ない時には grain が大きくなる傾向にある様である。

以上にのべたことは海水の表面については大抵の場合あてはまらない。海水の成長の途中には多かれ少なかれ降雪がある。多量の降雪があるとその重量のために氷が沈下して海水が氷

の割目をとおつて表面にしみ出して雪と混りあつて凍結したり、時には日射のために氷の上の雪が融け或は昇華変形して固まる。この様にして出来た雪氷は海氷とはまるで異なつた結晶構造を有している。又時には海氷自身の表面が日射などのためにとけたり凍つたりすることもある。この様な氷乃至は雪氷は雑多な向きのc軸を持つた氷粒の集合であることが多い。そのため海氷の表面近くの数cmの部分は偏光で見ると写真11—1~5の様に見える。この部分は空隙が多く非常にもろいことが多い。又明らかに氷又は雪融け水が下の方の氷を侵蝕していることも多い。この様なむしろ“ざらめ雪”に近い様な部分の厚さはいろいろであるが何れの結晶構造も殆んど同じで、のちに写真で示す様に殆んどすべての海氷の表面に見られる。

#### IV. いろいろの海氷の垂直及び水平断面

1956年2月に北海道オホーツク海岸の紋別港内で結氷した海氷は以上に述べた様な典型的な構造を示していた。今年2月に同じ港内で採取した氷も同様であつた。又同港外及び沖合で採取した流氷(何れも Medium ice floe 中氷盤)は一見した所では可成り複雑な構造を呈していたが何れも基本的には同じ構造から成り立っていることがわかつた。

観察に用いた海氷の厚さ、塩分、採取位置等は次のとおりである。

試料	氷の種類	氷厚 (cm)	塩素量 (観察時の)	採取位置	採取日時
A	流氷(中氷盤) <i>Medium ice floe</i>	26.5	0.98%	紋別港外	1. III
B	"	32.5	1.69	"	"
C	"	14	0.92	"	"
D	"	50	1.14	"	"
E	"	17	1.00	羅臼沖(根室水道)	9. II
F	流氷(小氷盤) <i>Small ice floe</i>	35	1.70	落石沖(太平洋)	22. III
G	定着氷 <i>Fast ice, Young ice</i>	12	1.08	紋別港内	6. II
H	"	16	1.68	"	"

A~Fの流氷の成長した位置は不明である。しかし今冬の気象状態が異常で平年より沿岸の水量が少なく、2月末日頃までは北海道沿岸に定着氷の発達が始んど見られなかつたことと、積算の寒さに対する氷厚の増加を示す既知の氷厚係数<sup>8)</sup>と採取時までの北海道周辺の気温とから考えると、少なくとも試料A(氷厚26.5cm), B(32.5cm), D(50cm), F(35cm)に示した氷は北海道より可成り北の方の海面で生成成長したものであることは間違いない。

A~Hの氷の構造を観察した結果は次の様に要約される。

1) 個々の試料についてみれば grain の大きさ、brine 細胞などが異なるが、何れも従来言われていた様なモザイク構造をなしてをり、しかも結氷の極く表面近くを除いたすべての部分にあてはまる。しかし grain や brine 細胞の違いが海氷の物理的・化学的諸性質に影響を及ぼ

す所が少なくないと思われるので、これら諸性質の測定、研究に当つては同時にその構造を観察することは欠くべからざることである。

2) 結氷の厚さの方向についてはその構造は必ずしも均質でない。したがつて結氷板か試料を切り出して諸測定を行なう場合には充分注意する必要がある。

3) 2, 3 の試料について2個以上の鉛直断面を作つて観察した結果水平方向の構造の違いは、2) よりはるかに少なかった。

4) 海氷中の brine cell は管状 (写真 6, 13, 18, 27), 球形 (写真 6, 10, 12, 30), 不定形 (写真 6, 10, 12, 27, 30) の3種類に分類される。

5) 港内で採取した定着氷の grain は 1956 年 (写真 8, 9) のものも 1957 年 (写真 11) のものもあまり大きさが違わなかつた。それに較べて流氷では grain が何れも可成り小さい (写真 15, 20, 23, 26, 28)。

6) 表面近くの数 cm の部分にはざらめ状の小さな氷粒から出来た部分がありその下の部分では以下に述べるとおりであつた。

7) 試料 A, B, E, F, G, H では grain の大小の違いはあるけれども氷の底面まで海氷の基本的な成長過程を示している。

8) 試料 F (写真 30) ではざらめ状の表層部の下に典型的な成長が見られるがその下に更にざらめ状の部分が見られ、結氷の上下の区別がつけにくい程である。

9) 試料 C と D では (写真 22, 25) 典型的に成長した部分とざらめ状の部分が交互に交替して縞模様をなして成長していた。

6) 以下に稍詳しく述べることは恐らくは海氷の生成、成長時の条件の違いによるものと思われるが、それらについては将来の研究にまたなければならぬ。

次に個々の試料を観察した結果について述べる。

#### 試料 G (氷厚 12 cm, 紋別港内)

採取時には紋別港内には氷厚 12 cm 及び 16 cm の2種類の定着氷 (板状軟氷 *young ice*) が発達していたが、その翌日にはすべて流出した。

これらの氷は1月20日頃から結氷し始めた。結氷後に1月27日から30日の間に異常に気温が上昇して平均気温が正になり、しかも多量の降雨があつた。そのためその当時までに成長した氷は殆んど融解しかかつたものとおもわれる。その後平常の寒さにもどつたので一度融けかかつた氷も再び凍結し、底面から新たな氷の成長が始まつた。

写真 10 にこの試料の鉛直断面の偏光写真及び透過光による写真を示した。表面から氷厚の凡そ 1/2 に達するざらめ状の部分は前記の高温と降雨によつて破壊された部分であり、不定形の空隙が多い。その後成長した氷は典型的なモザイク構造を示してをり grain も前述した様に次第に大きくなる傾向にあり、brine 細胞は球形のものが多く、採取時には氷温は  $-1.2^{\circ}\text{C}$  で底面には所々に穴があき蜂巢氷 (*Rotten ice*) になりかかつてをり、写真 12 にはその様子が

あらわれているが結晶構造には変形が起つていない。

Grain の成長及びモザイク構造を確かめるために、この氷を表面から 1 cm 毎に水平断面を作つたのが写真 11 である。ざらめ状の部分でも下の断面ほど氷粒が大きくなつている。鉛直断面からも grain が成長している模様は良くわかるが、各断層写真でも同じ grain の諸断面を対応させることが出来るし底面に近づくにつれて劣勢な grain は消滅して一般に大きさが増しているのが確かめられる。

ここで注目すべきことは、写真 11 の断面 6, 7 の大部分を示める黒い部分は  $c$  軸が紙面に垂直即ち鉛直方向を向いた氷であることである。 $c$  軸が試料の面に垂直であることは十字ニコルの視野で試料をその面内でどの方向に廻転しても真黒に見えるので容易に確かめられる。この様に  $c$  軸の向きが鉛直の氷が出来たことについては次の様に考えられる。湖や池で淡水が凍結して出来た氷の  $c$  軸は概ね鉛直方向を向いているが、海水も静かな環境で一例えば低温実験室内で一凍らせると先ず  $c$  軸が鉛直方向を向いた氷晶が出来<sup>9)</sup>。その氷が結晶の成長速度の速い  $a$  軸の方向即ち海水表面上に一面にのびる。更に冷却を続けて氷の厚さが数 cm に達するうちに  $c$  軸が水平方向を向いた氷が出来て来てやがてそれが優越し、それ以後の氷厚の増加は既に述べたと同じ経過をたどる。実際の海面では静かな状態でもいくらかの騒乱はまねかれないので結氷初期には  $c$  軸が鉛直方向を向いた氷晶の一部は廻転して傾いた状態になる。そのため  $c$  軸が鉛直を向いたうすい膜状の氷と共に  $c$  軸がある傾きをもつた氷が出来る。しかし人工的に凍らせた場合と全く同様に、厚さが 2~3 cm に達するとその後に発達する結晶は殆んどすべて  $c$  軸がほぼ水平面内にあるものばかりになる。今問題にした部分の氷は、一度出来た氷がざらめ化してしまつた後に再び成長を始めた部分に当つている。この場合に boundary となつた上の氷は全く雑多な方向の  $c$  軸をもつた氷粒状であるから新たな結晶の成長に際して結晶学的な制約を与えない。しかも風や波による海水の騒乱も少ないので、人工的に静かな環境で海水を凍結させた場合と同じ経過をたどつて、先ず  $c$  軸が鉛直な氷が出来たのであろうと考えられる。さうしてその後の成長は写真 10 に明らかな様に典型的な海水の構造を示している。或いは又、降雨によつてもたらされた淡水がとけかかつた結氷と海水の間に膜状に広がつていたものが凍結してその部分だけ  $c$  軸が鉛直を向いたのかも知れない。

brine 細胞は表面近くには不定形のものが多く、底面近くには球形のものも多く見られる。海水がその発達の初期には上に述べた様に、はじめに  $c$  軸が鉛直方向を向いた結晶が出来るとの様な原因と機構によつて、間もなく  $c$  軸が水平面内にある結晶に移るのかは今後の研究にまたなければならぬ。

#### 試料 H (氷厚 16 cm, 紋別港内)

垂直断面を写真 12 に示した。試料 G と共に紋別港内を占めていた定着氷である。表面から 7~8 cm の部分は試料 G と同様にしてざらめ化して居りその後は平凡な成長を示している同じ港内にあつた氷にも拘らずこの試料には前者に見られた  $c$  軸が鉛直方向を向いた氷が見られない。氷は厚くなる程同じ気温に対しての成長量が少いから、1 月下旬の高温、降雨の

ちに成長した厚さは H の方が G より少ない筈である。この点に注目して両者の鉛直断面を較べると H では降雨による組織の破壊が当時の結氷の底面までは及んでいないことがわかる。

brine 細胞は表面から 5 cm 位の間には不定形、底面から 3 cm 位の部分には稍太い管状のものがありその中間は球形のもののみが見られる。写真 4 と 7 はこの氷の表面から 13.5 cm (底面から 2.5 cm) の水平断面である。G の水平断面に較べて grain が稍小さいだけで目に付く様な違いはない。写真 4 には管状の brine 細胞の切り口が見える。

#### 試料 A (氷厚 26.5 cm, 紋別沖流水)

鉛直断面を写真 13 に示した。写真 8, 10, 12 に較べると結晶構造が非常に複雑に見えるがこれは grain が小さいのでそう見えるだけで結晶の成長のしかたは全く同じである。表面近くのざらめ状の部分は粒子が大きいのが特徴的である。底面附近に一見ざらめ状の様な部分が見受けられるが、何等かの原因によつてモザイク構造の発達が順調でなかつたことをあらわしている。

brine 細胞は結氷の上半分に多くしかも管状のものが断然多いが必ずしも結氷の下面まででは続いていない。

grain が小さいことは水平断面を示した写真 14 (底面から 1.5 cm), 15 (底面から 2.5 cm), 16 (底面から 8.5 cm) で明らかである。他の位置で水平断面を作つて見ても殆んど同様である。何れの写真でも小さな grain ——時には 1 枚の氷板からなる——が複雑に入り混つている。鉛直断面からもわかるが鉛直方向の grain の消長は可成り盛で、僅か 1 cm 離れた 2 つの断面を示した 14 と 15 でもある grain は小さくなり他のものは大きくなつている。更に 16 に到つて 15 に見られた grain は全く見当らない。14 には鉛直断面で見られる管状の brine 細胞の断面があらわれている。

表面から 2 cm の断面が写真 17 であり、大粒のざらめ状をしているのがわかる。結氷がある程度の厚さ以上になれば氷の表面と海水の表面とのへだたりが大きくなるので、ある厚さになる迄降雪のなかつた場合にはその後の多少の降雪によつては海水が結氷の表面に迄滲み出して来ることがなく、したがつて今迄にのべた様な小粒の見事なざらめ状の氷は出来にくくなるものと思われる。即ちこの試料 A は次に述べる試料 B と同様に降雪の少なかつた海面で発達したものと思われる。

#### 試料 B (氷厚 32.5 cm, 紋別沖流水)

鉛直断面の写真 18 からわかる様に結晶構造は殆んど A と同様であり、しかも brine 細胞が非常に多い。grain が小さくしかも成長の途中で消長がはげしいことも A と同じである。所々に brine 細胞の少ない層が見られるがその部分では結晶は単調に成長している。

水平断面 19 (底面より 6.5 cm), 20 (表面より 12.5 cm) で grain の小さいことは更に明らかである。ただ 20 ですべての grain が殆んど平行にならんでいる様に見えるのは珍らしい。写真 21 に表面から 3 cm の部分の水平断面を示した。brine 細胞もしくは空隙の多い所であり海水の典型的構造が見られるが次第にざらめ化しつゝあるのがわかる。やがては写真 17 の様

に変化するものと思われる。

#### 試料 C (氷厚 14 cm, 紋別沖流水)

極めて複雑な結晶構造をしていることは写真 22 から直ちにわかる。採取した試料の上下両面は他の氷と同じに平行であつたが内部の結晶構造は傾いている。即ちざらめ化した部分とモザイク構造の部分とが交互に存在してしかもその境界面が水平より明らかに傾いている。この試料を採取した氷盤は可成りの面積をもつていたので何かの原因である時期に傾いた状態のまま成長するということも考えられないし全く理解に苦しむ所である。しかし局部的に見れば今迄に述べた氷と相似た構造を示している。写真 23 は底面から 1.5 cm の断面でモザイク構造が半ば破壊されてざらめ化しているが、内部のモザイク構造のはつきりしている部分を斜めに切つた断面の写真 24 では grain は小さいが海水の典型的モザイク構造であることが確かめられる。ただこの氷は空隙乃至は brine 細胞が多く(不定形をしている)偏光写真にまでそれがあらわれている。取扱つた時の感じでは他の試料に較べてもろい。

#### 試料 D (氷厚 50 cm, 紋別沖流水)

採取した試料のうちでもつとも厚い氷で鉛直断面を写真 25 に示した。この試料でもモザイク構造のはつきりした部分とざらめ化した部分が交互に発達しているのは興味深い。ただ試料 C と異なりそれらの境界面が略々水平である。成長の途中で時々結氷温度より高い海水に短期間接したために周期的にざらめ化した部分があらわれたのか、或いは周期的に気温が高くなり成長速度が非常におそくなつたためにこの様な縞模様が生じたのか、又は他の原因によるのが全く不明であるが注目すべき成長である。水平断面(底面より 6 cm)を示した写真 26 は既に示した他の試料の水平断面と大同小異である。

#### 試料 E (氷厚 17 cm, 羅臼沖流水)

鉛直断面 27 及び底面から 4.5 cm の水平断面を示した写真 28 から判る様に観察に用いた試料のうちでもつとも小さな grain から出来ている。brine 細胞は少し短い管状でその量も多い。底面から 8 cm の水平断面を示した写真 29 では grain は更に小さく、28 ではさうでなかつたのに 29 では grain が平行にならんでいる様に見えるのは写真 16 と同様である。写真 29-2 からわかるが、この位置では一面にすき間だらけと言ひ表わせる位であり、表面から数 cm 位の間はざらめ化している。

#### 試料 F (氷厚 35 cm の氷の上下両面を切り取つたもので厚さ 24.5 cm, 落石沖流水)

落石(北海道南東岸)沖で採取した氷厚 35 cm の氷の上下両面をそれぞれ 5 cm ずつ切り捨てた残りの部分がこの試料で、写真 30 が鉛直断面である。表面から 1/3 位の間は未だ完全にはざらめ化していない様であるが、底面近くの部分は殆ど完全にざらめ化している様である。brine 細胞は中央部には殆ど見られなくて、表層部には球形及び管状、下層部では空隙が多い。表面から凡そ 13 cm のこの氷の中央部の水平断面が写真 31 で brine 細胞が少なく grain も、G、H と同じ位の大きさであるのが目立つている。

試料 C、D の項でもが述べたが、表面近くがざらめ化するのとは同角として、この試料の

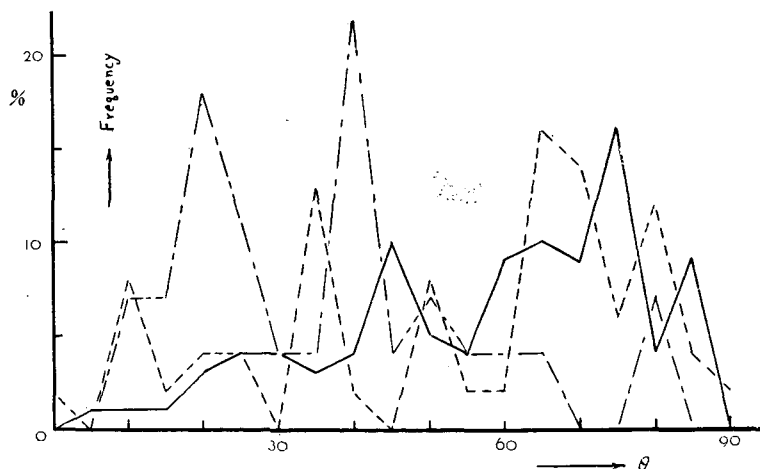
様に下層部が明らかにざらめ化するのは興味深い。但しこの場合は大氷盤の上に乗っていた長さ1 m 幅40 cm 位の小氷塊を拾い上げたものであるから、結氷が成長後に流水として漂流するうちに上下が転倒して底面であつた部分が雪をかぶつたり海水を浴びたりして写真に示した様な構造になつた可能性は非常に大きい。之に対して試料 C, D はずつと面積が大きいのでこの様なことは全く考えられない。仮に以上にのべた様な原因で底層部もざらめ化したとしても、その境界がさわめて明瞭であるのは注目されることかもしれない。

### V. 短冊状結晶薄片の分布

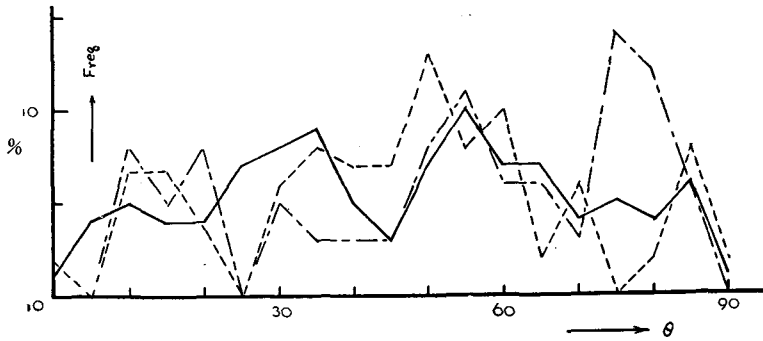
水平断面で見られる様に短冊状薄片の集塊は互にある角度をなして交わつている。福富<sup>10)</sup>は低温実験室内で作つた人工海水の裏面のモザイク模様から隣り合つている模様間の交角を読み取つて、氷片集塊間の交角は $60^\circ$ 位のものが多いことを指摘している。筆者等も天然の海水のいくつかについてこの交角を測定してみた。その為に前に記した Universal Stage の載物台に結氷の水平断面の試料を固定して水平面内で廻転し、便宜上5度廻転する毎に写真を取り氷片の集塊が偏光のもとで次々に消光する角度を写真から読み取つた。即ち筆者等は $c$ 軸の交角を測定したことになる。又その交角としては鋭角のほうを採用した。

測定の結果を交角5度毎にその頻度をとつて現わしたのが第1, 2図である。図には各試料毎に別々の線で記入した。横軸の0度と90度は測定に当つては区別出来ず、この場合は何れも相隣る grain の $c$ 軸が直交していることをあらわす。 $c$ 軸の交角が数度にすぎないものは一つの grain と見做し、極端に小さい grain は省略した。測定された角度の数は各試料毎に30~60個である。

図からわかる様に、個々の試料については頻度分布に夫々いくつかの山が認められるが、全体では殆んどすべての角度にわたつて分布している様に見える。第1, 2図を一括して5度

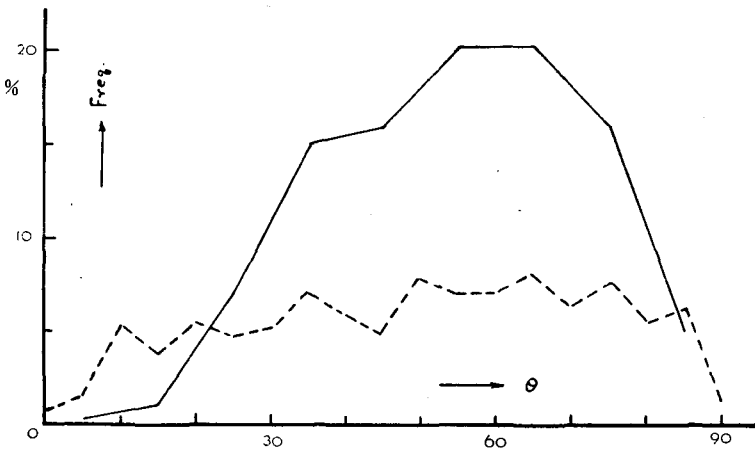


第1図  $c$ 軸の交角の頻度分布 (何れも1956年、紋別港内の定着氷)



第2図 c軸の交角の頻度分布

(実線: 1957年紋別港内定着水 破線: 試料E 鎖線: 試料D)



第3図 c軸の交角の頻度分布

(実線: 人工海水, 福富(文献4)による 破線: 天然海水)

毎の分布で表わしたのが第3図であり、特に頻度の多い角度は見当たらない。ある grain が他の2つの grain のみと接触している場合にはc軸の交角の平均は $60^\circ$ になり、他の3つの grain と接触している場合には $45^\circ$ になる。しかし一般にある grain はもつと数多くの grain に周囲をかこまれていることは既に示した写真から明らかであり、この場合には問題は複雑で交角がある特定の値を多く示すとは考えられない。又例えば、写真19と20、28と29の様に同じ結氷でも表面からの距離によつて grain 間のc軸の交角が異なつていことが一見してわかるものがあるので、筆者等の測定の結果と併せ考えると、となり合つた grain 間のc軸の交角即ち短冊状薄片の交角の分布はある特定の試料についての測定か又は測定の数が少ない場合には、ある角度の所に頻度の最大が見られるが、一般には結晶学的に意味づけられるある特定の角度に頻度の最大があるのではなく、むしろ random な分布をしているものと考えられる。第3図に同時に示した福富の結果は人工的に作った海水についての結果でもあり、その結論を一

般に海水の場合にふえんして用いることは一考を要すると思われる。

$c$  軸の交角が数度にすぎないものが沢山あつたが、これは本来は一個の grain として成長すべきものが、例えば氷の生成の際に体積の膨脹のために周囲に及ぼす stress などのために、一部分の短冊状氷片が廻転させられたものであろう。或いは又その他の原因にもよるのであろうが、写真 15 と 16, 19 と 20, 28 と 29 の様に氷の成長につれて grain のならび方に著しい相違が生ずるのは興味深い問題である。

## VI. 結 語

種々の海水の構造を観察した結果について述べたが、その結果は第 IV 節のはじめに記した点に要約される。海水は基本的にはモザイク状の構造をしていることを確かめることが出来たが、個々の海水についてはそれらの構造の発達の模様は決して一様ではなく、同じ氷であつてもその位置——表面からの距離——によつて異なつている。海水の物理的及び化学的諸性質の測定にあつては当然注意しなければならない。田畑<sup>1)</sup>が以前に測定した海水の粘弾性係数の測定結果があまり良い一致を見なかつたのは、その構造の相違による所が大きいのかかもしれない。第 V 節にのべた grain と grain の  $c$  軸の関係については別の機会に更に考察を進めたいと思つている。以上の観察に用いた海水は何れも一冬氷であるが、低温実験室内に約 1 年間保存した結果では (保存温度約  $-10^{\circ}\text{C}$ ) その結晶構造は殆んど変化しなかつたので、例えば極近くの高緯度地方の多年氷でもその結晶構造は筆者等の観察したものとあまり異ならないと思われるが興味を引かれる問題である。

この研究に際して試料の採取にあつては当研究所大浦浩文、石田完、藤岡敏夫、鈴木義男の諸氏、第一管区海上保安本部、紋別市役所、紋別漁業協同組合、北海道開発局紋別港湾修築事務所、大洋漁業株式会社紋別事業所の御協力をいただいた。又鈴木義男氏、当研究所雪氷研究グループの吉田順五教授ほか諸氏には激励と有力な助言をいただいた。おわりに臨み厚く感謝いたします。尚この研究に要した費用は文部省特別研究費 (海水の物理的性質に関する研究) に依つた。あわせて謝意を表します。

## 文 献

- 1) 大浦浩文・木下誠一 1956 凍土・海水・池水の曲げ強度及び圧縮強度の測定について. 低温科学, Ser. A, **15**, 137.  
 山地健次・黒岩大助 1956  $0^{\circ}\sim 100^{\circ}\text{C}$  の範囲における氷の粘弾性. 低温科学, Ser. A, **15**, 171.  
 田畑忠司 1956 海水の粘弾性の研究. 低温科学, Ser. A, **15**, 101.  
 ——— 1955 海水の粘弾性係数の測定. 低温科学, Ser. A, **14**, 25.
- 2) Krümmel, O. 1907 Handbuch der Ozeanographie. Bd. I., 501.
- 3) 楠 宏 1956 採氷用コアドリル. 低温科学, Ser. A, **15**, 197.
- 4) 福富孝治・斎藤光郎・工藤義夫 1953 海水の組織特に氷殻における純氷率と短冊状薄氷片, 氷片集塊について. 低温科学, **9**, 113.

Zubov, N. N. 1945 L'dy Arktiki (北氷洋の水, 低温科学研究所訳) Moskva. 111.

5) Zubov, N. N. 1954 同上, 113.

6) Whitman, W. G. 1926 Elimination of Salt from Sea-water-Ice. Amer. Jour. Sci., 5th, Ser.

### 11.

7) Zubov, N. N. 同上, 114.

8) 福富孝治・楠 宏・田畑忠司 1950 海水の厚さの増加について. 低温科学, 3, 171.

9) 鈴木義男 未発表.

10) 4)に同じ.

11) 田畑忠司 1)に同じ.

## Résumé

As one can see the mosaic pattern of the base of sea ice at once, it has been pointed out that the structure of sea ice is of mosaic type constructed from thin crystal ice sheets developed vertically. However, the structure of sea ice was not yet been observed scientifically.

The writers, using a motor saw and a hand plane, made thin ice plates (0.6-0.8 mm of thickness, 6-8 cm of width, 10-35 cm of length) of vertical and horizontal sections of sea ice which had formed in various places. The character of the structure, the brine cells and the air bubbles, were observed utilizing these thin ice plates.

In the sea ice, brine and air or gas exist enclosed in cells. Brine cells or air bubbles are divided into three main classes: cylindrical type, spherical type and irregular type (plate 6). The distributions of cells are easily recognized from vertical (plates 10, 12, 13 etc.) and horizontal sections (5, 14, 21 etc.) which were photographed under dispersed light.

In the horizontal sections (4, 5, 16 etc.), one can notice the horizontal sections of each vertical thin ice sheet and can recognize that these ice sheets are standing parallel side by side constituting a small ice block (grain), and that the direction of the parallel ice sheets in each grain are different. The growth of ice sheets to vertical direction was ascertained from the photographs of serial horizontal sections which were sawed out at various distances from the surface of the same ice (5). As each vertical thin ice sheet is a monocrystal and its main axis of crystallization (*c*-axis) is perpendicular to the vertical wide plane, therefore, each *c*-axis which exists in sea ice is parallel to the horizontal plane and, moreover, points in various directions for each small ice block. Accordingly, these small ice blocks ought to be recognized from the observations under polarized light. From plates shown as 4, 7, and 5, one can see this relation.

The distribution of angles between the directions of *c*-axis of neighbouring grains were measured (Fig. 1-3) by using the universal stage (2), and it seems that the angles are distribute at random.

The mosaic structure of sea ice was ascertained from the observations of ice plates sawed out along the vertical (8, 10, 12, 14 etc.) and horizontal sections (7, 9, 11, 13 etc.) under polarized light and dispersed light simultaneously.

Typical structures of sea ice are to be seen in 8, 10, 13, 14, 15, 19, 28 and 31. But in these photos, the dimensions of the grain are different and it seems that grains of the fast ice are larger than such average units of ice floes. In the surface of ice, deformed structures caused by solar radiation, snow cover and other factors are observable. In plates 25, 26 and 31 layers of typical structure and a deformed one exist alternately. It seems that the formation of these stripe pattern structures and the dissimilarity of dimensions of grains are consequent upon differences of the conditions of ice formation.

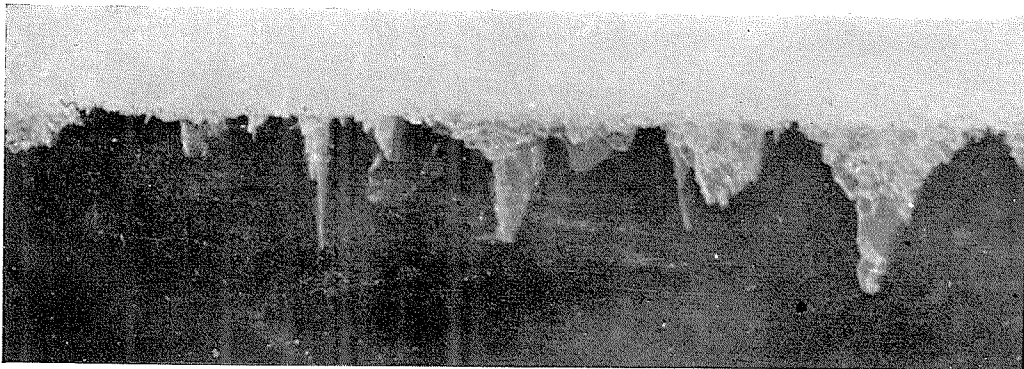
It is obvious from this report that on the occasions of studying the physical and chemical properties of sea ice, one should devote his attention to the structure of sea ice.

Studies upon the relation between the conditions of ice formation and its structures will be reported in the near future.



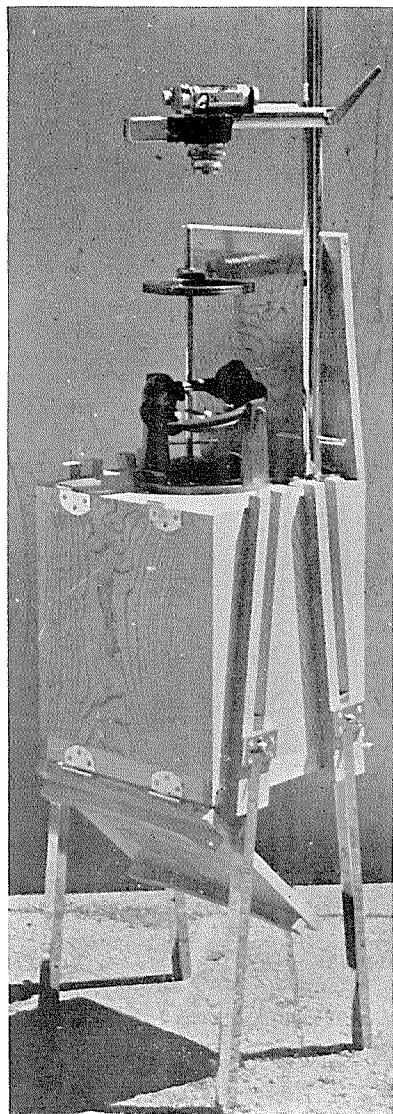
1. Mosaic Pattern of the base of Sea Ice

×1

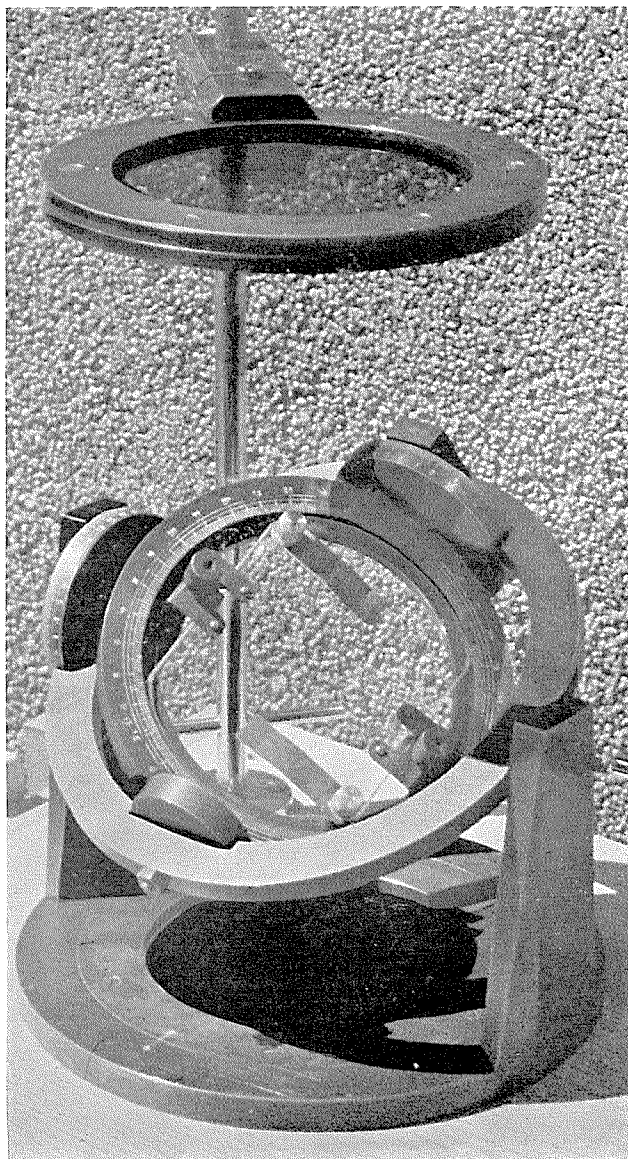


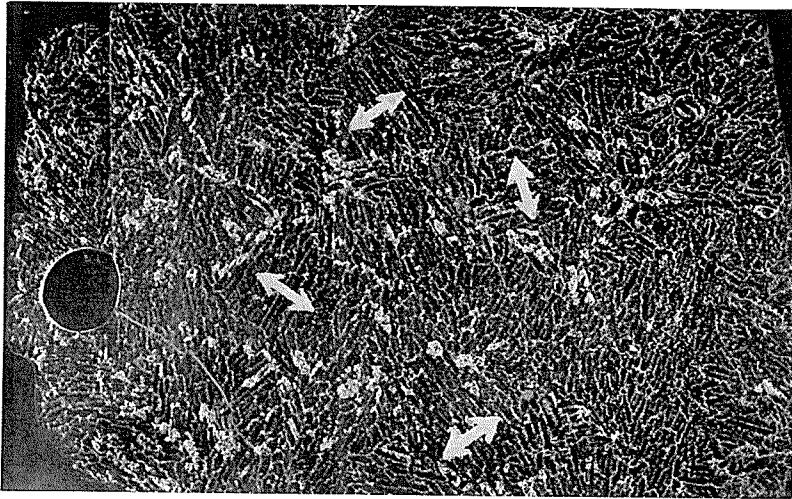
3. Thin Ice Crystal grown up from the base of *Young ice*.

×1

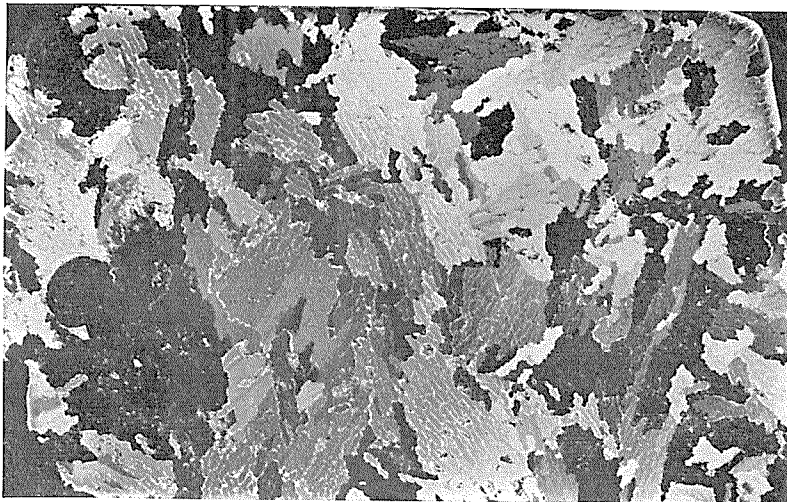


2. Universal Stage





4. Mosaic Pattern of horizontal section ( $s'=2.5$  cm) of Sample H.  $\times 1$

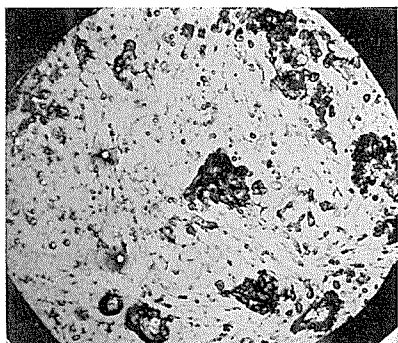


7. Crystal structure (ditto to 4)  $\times 1$

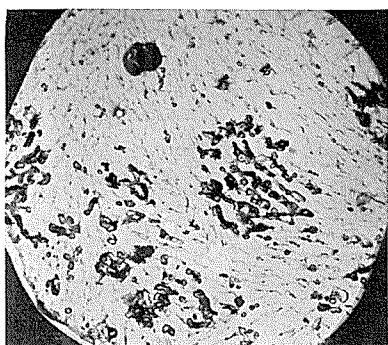
$s'$ : distances from the base of sea ice.

$s$ : distances from the surface.

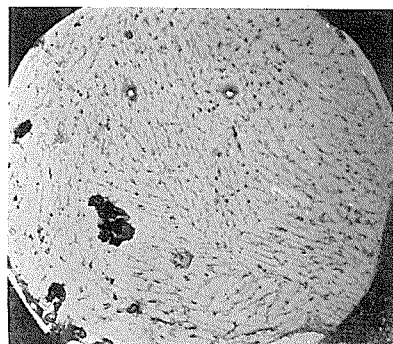
Serial horizontal sections



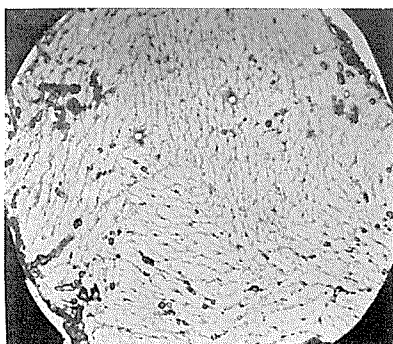
1.  $s=4$  cm



2.  $s=9$  cm



3.  $s=13$  cm



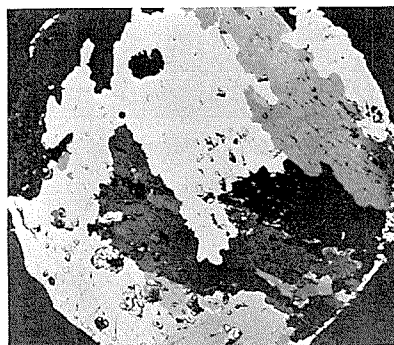
4.  $s=16$  cm

5.

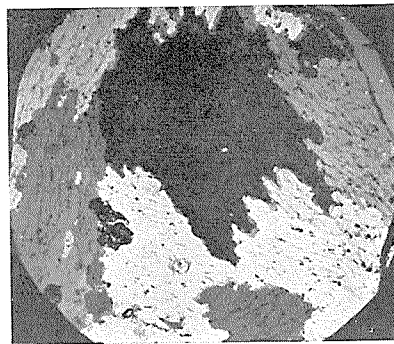


1.  $s=4$  cm

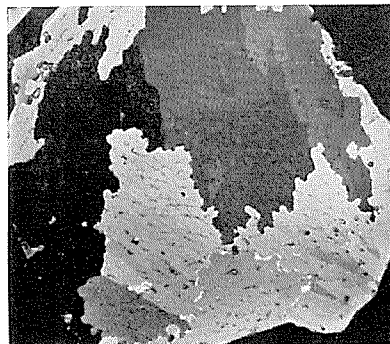
9.



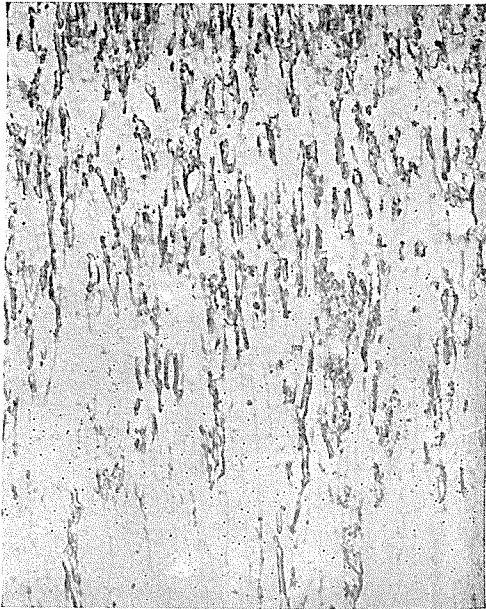
2.  $s=9$  cm



3.  $s=13$  cm



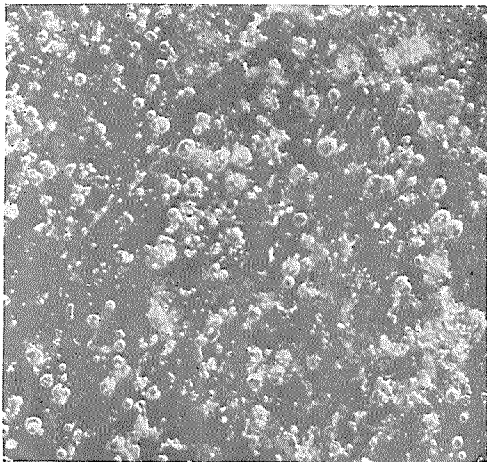
4.  $s=16$  cm



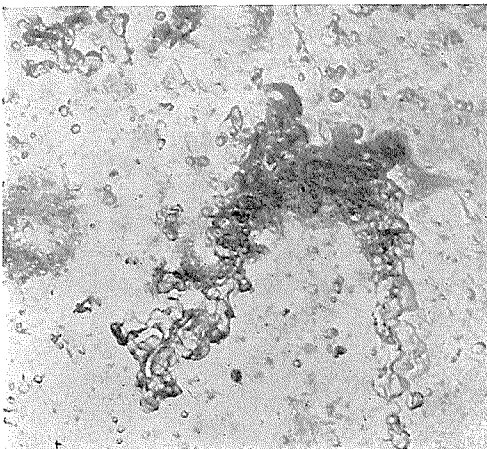
1

6. Brine Cell  $\times 1.5$

- 1. Cylindrical type
- 2. Spherical type
- 3. Irregular type



2



3



$\times 1$

8. Vertical Section

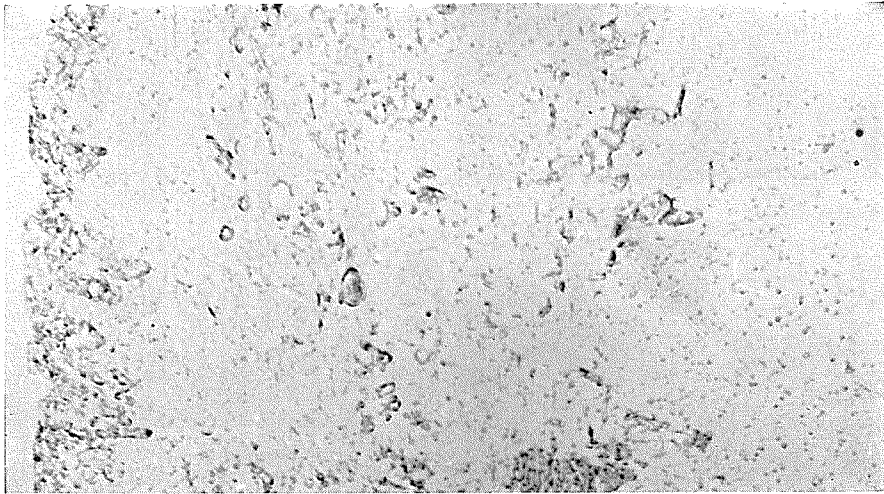
('56 Feb. Monbetsu)

Horizontal sections are  
shown in Plates

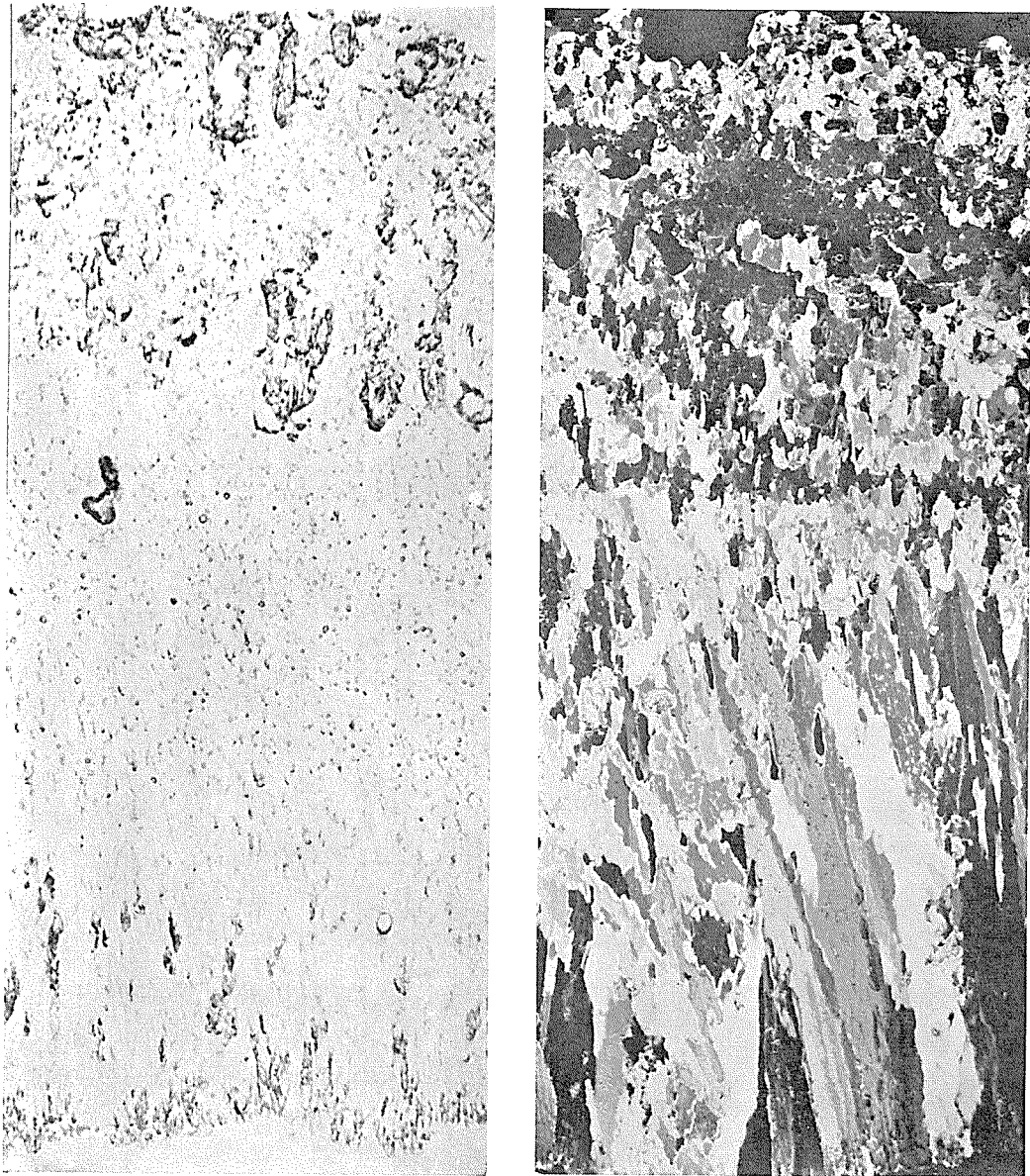
- ← 11— 1
- ← 2
- ← 3
- ← 4
- ← 5
- ← 6
- ← 7
- ← 8
- ← 9
- ← 10
- ← 11
- ← 12



× 1

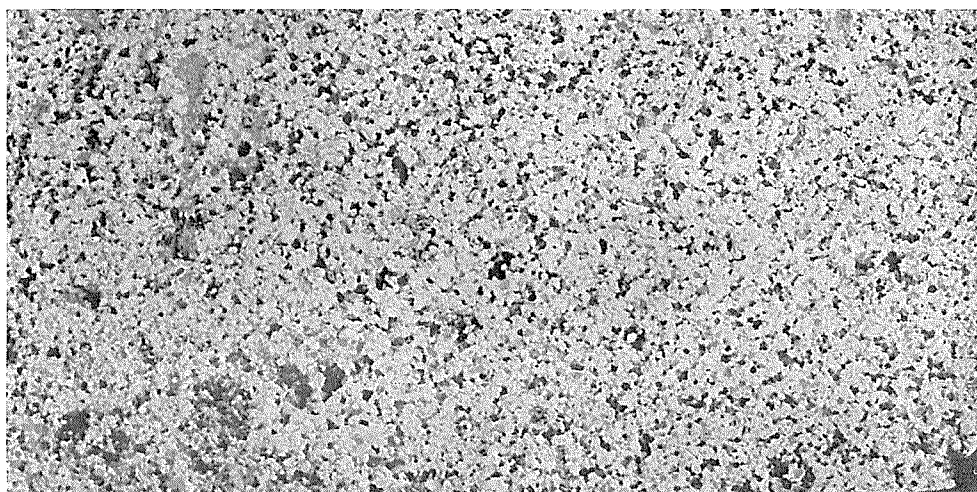


10. Vertical Section (Sample G, 12 cm of thickness)

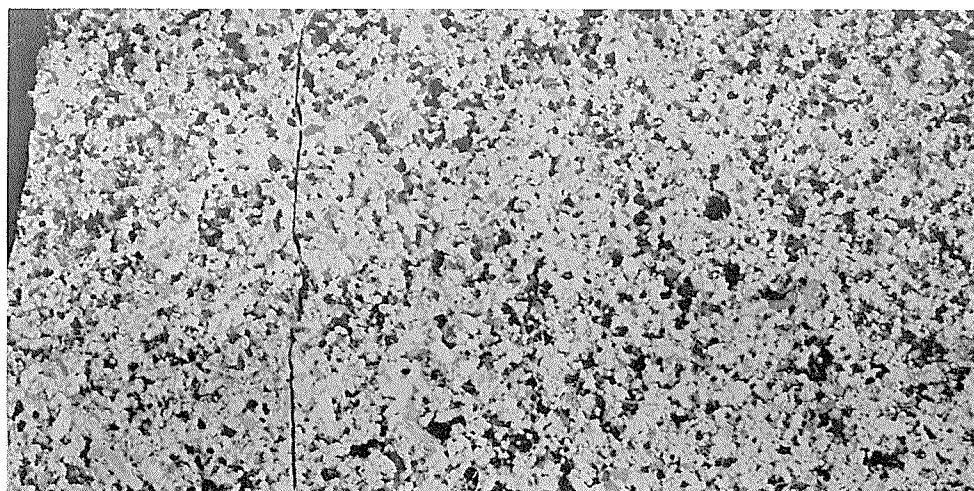


12. Vertical Section (Sample H, 16 cm of thickness)

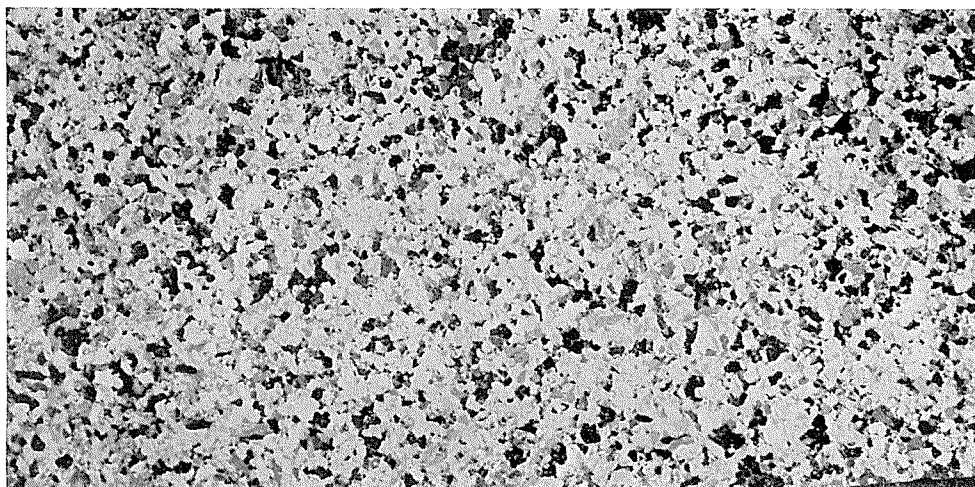
11. Serial Horizontal Sections (Sample G)



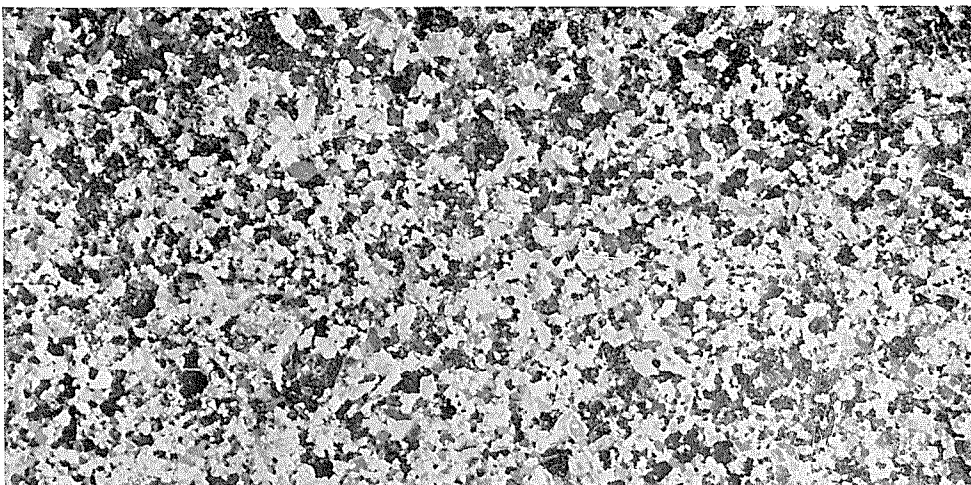
11-1  
s=1.5 cm



11-2  
s=2.5 cm



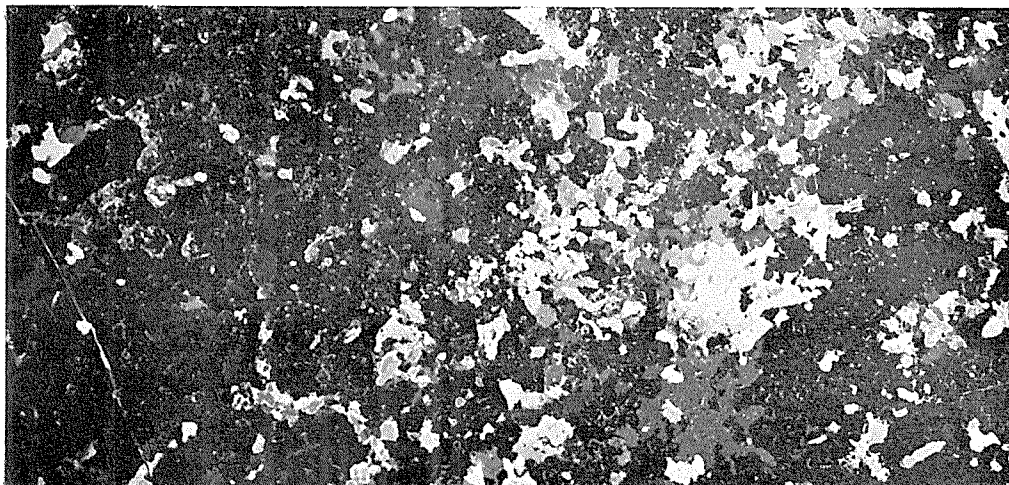
11-3  
s=3.5 cm



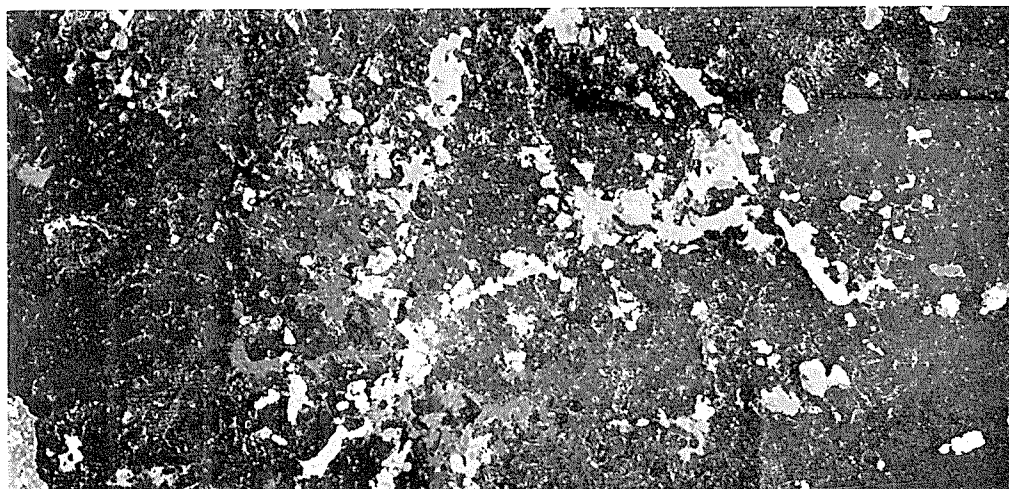
11-4  
s=4.5 cm



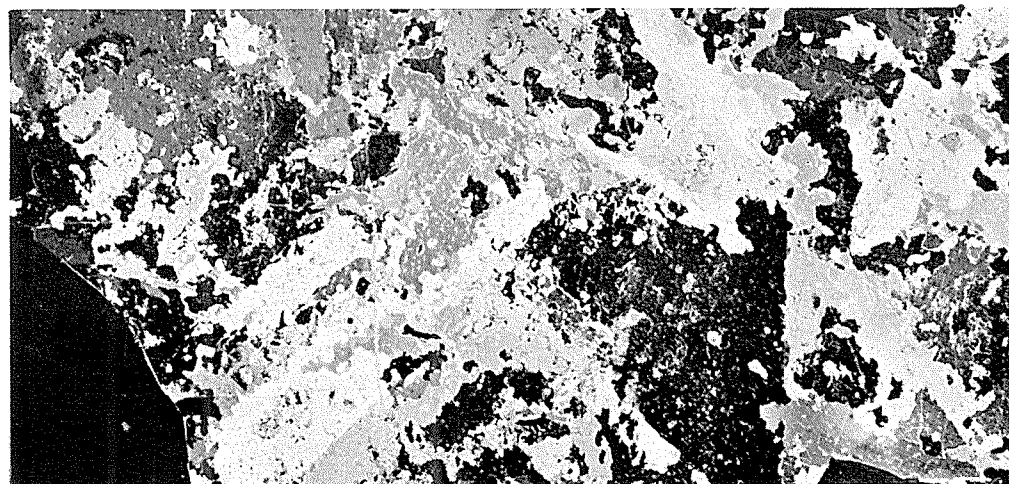
11-5  
s=5.5 cm



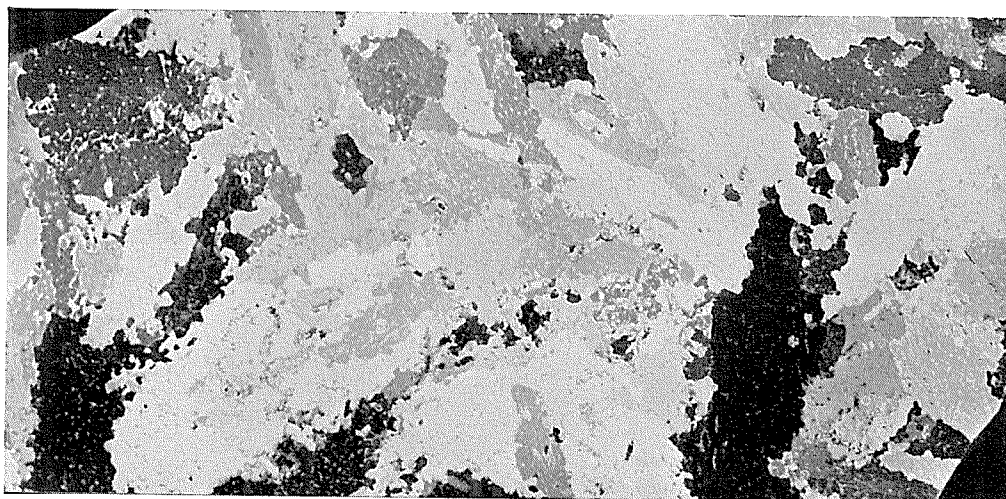
11-6  
s=6.5 cm



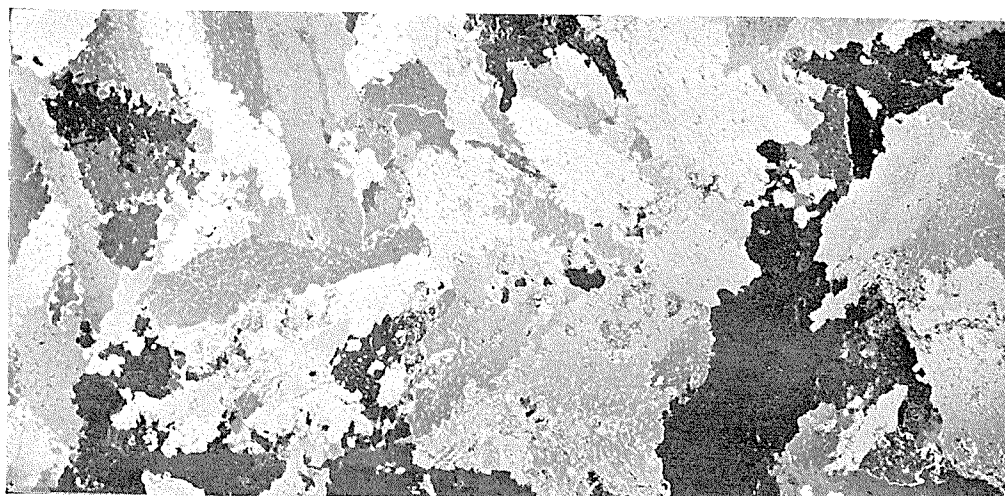
11-7  
s=7.5 cm



11-8  
s=8.5 cm



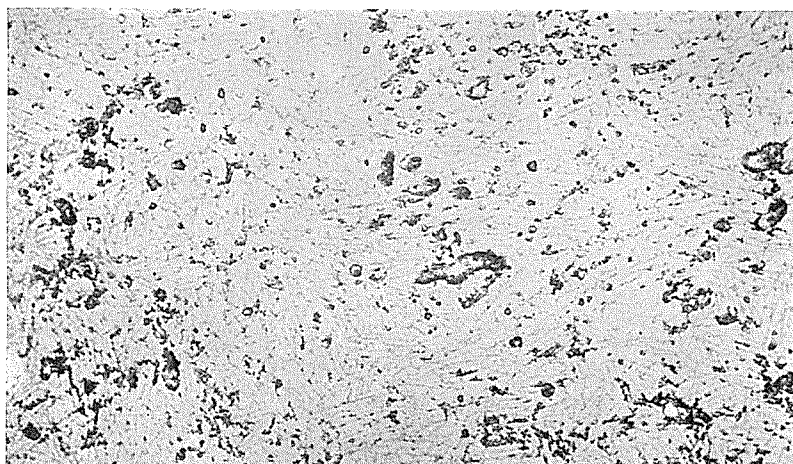
11-9  
s=9.5 cm



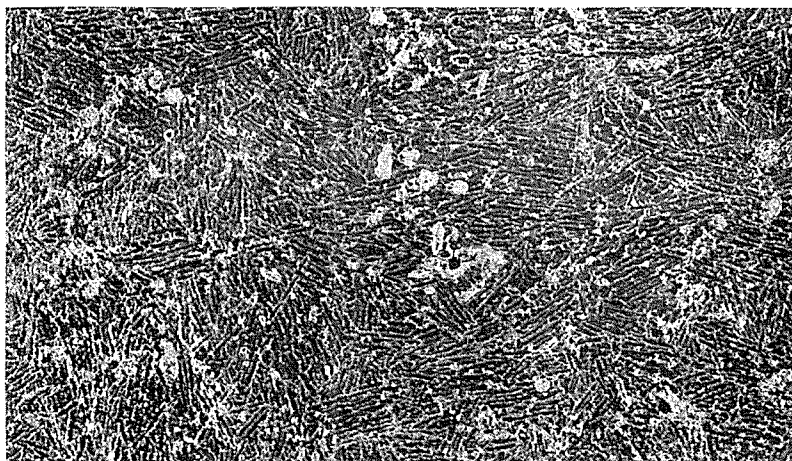
11-10  
s=10.5 cm



11-11  
s=11.5 cm



brine cell

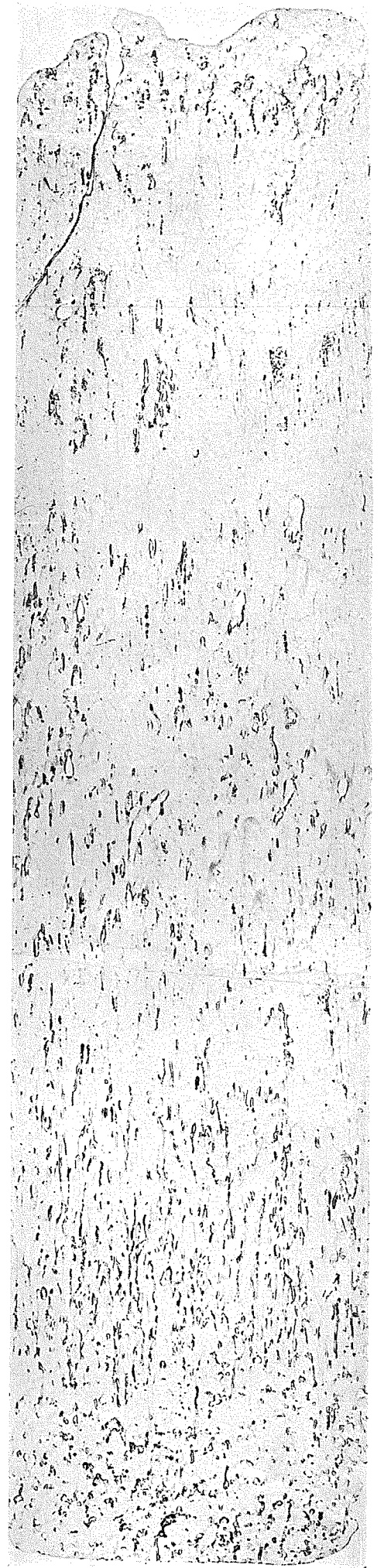


Mosaic  
structure

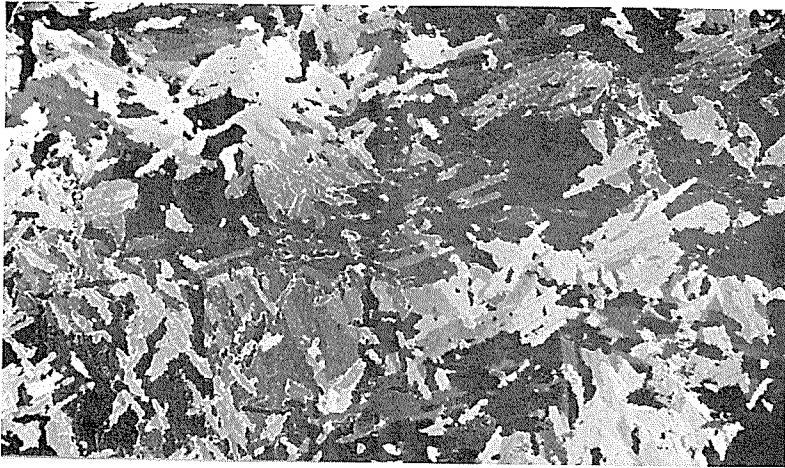


Crystal  
structure

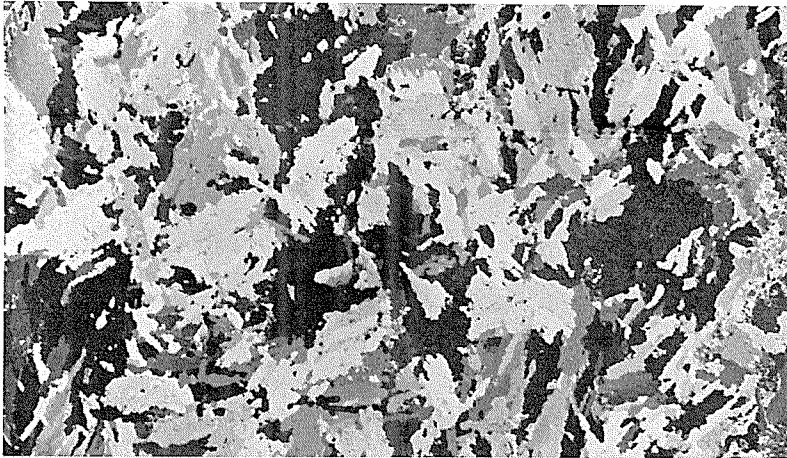
14. Horizontal Section (Sample A)  $s' = 1.5$  cm.  $\times 1$



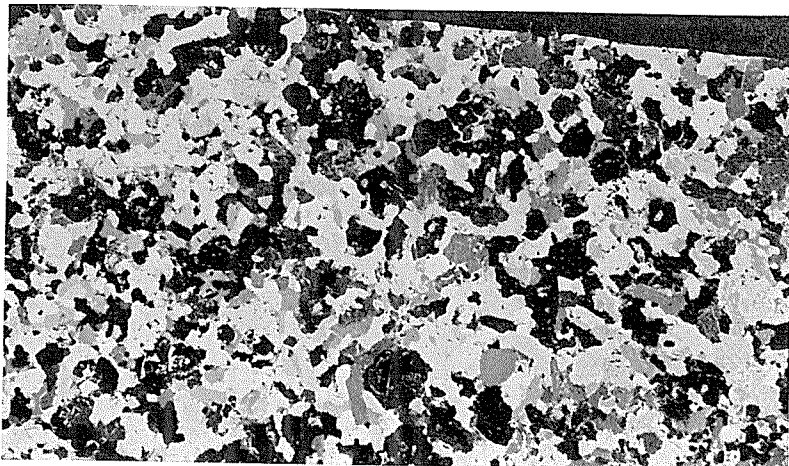
13. Vertical Section (Sample A, 26.5 cm of thickness)



15.  
 $s' = 2.5 \text{ cm}$



16.  
 $s' = 8.5 \text{ cm}$



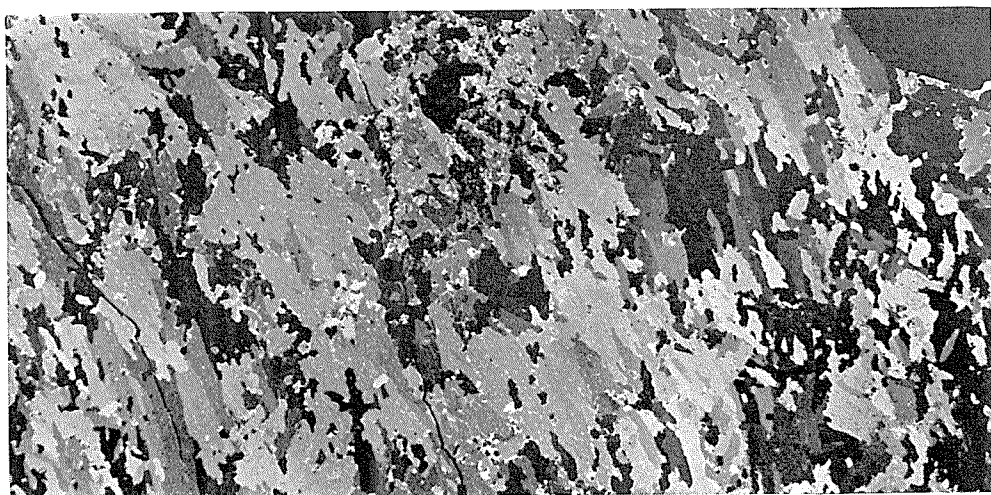
17.  
 $s = 2 \text{ cm}$

Horizontal Sections (Sample A)

×1



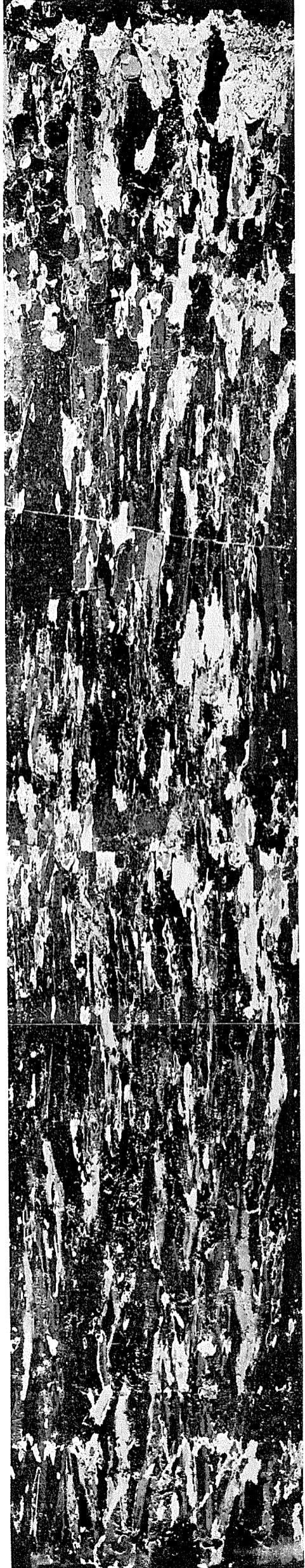
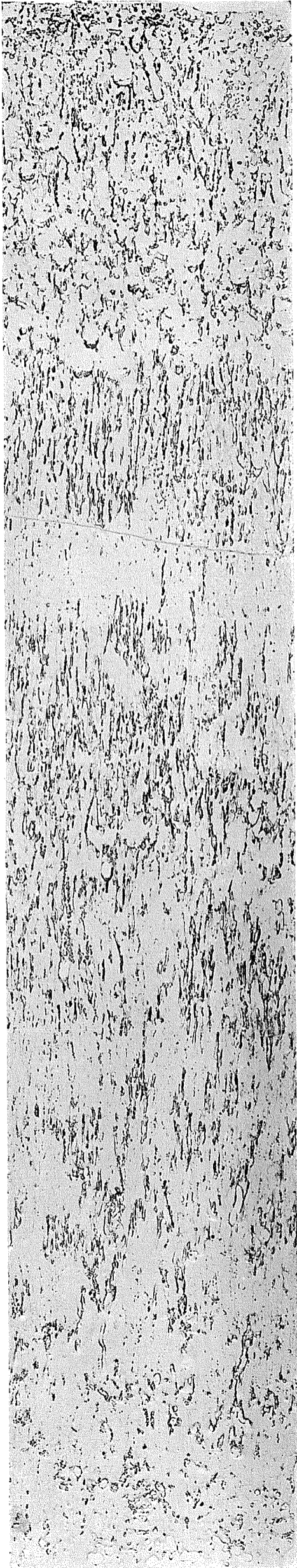
19. Horizontal Section (Sample B)  $s' = 6.5$  cm ×1



20. Horizontal Section (Sample B)  $s = 12.5$  cm ×1

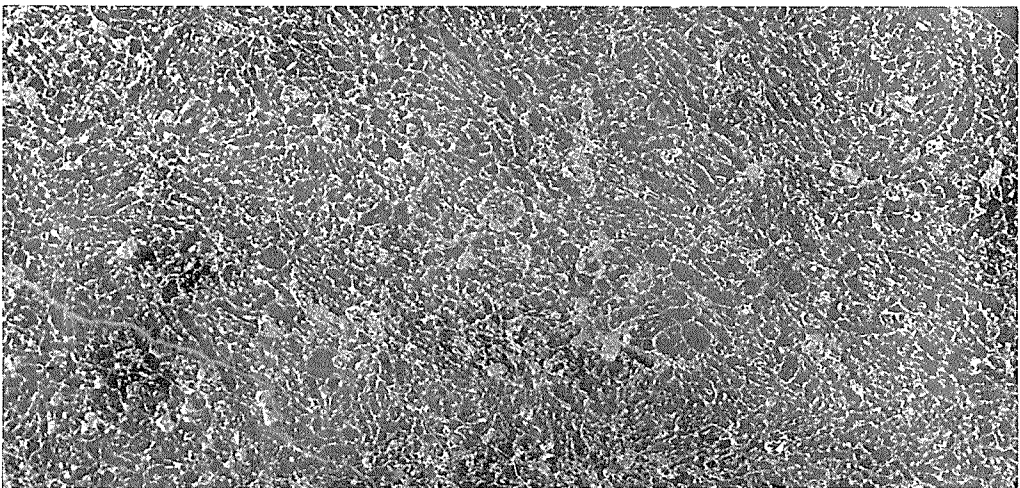
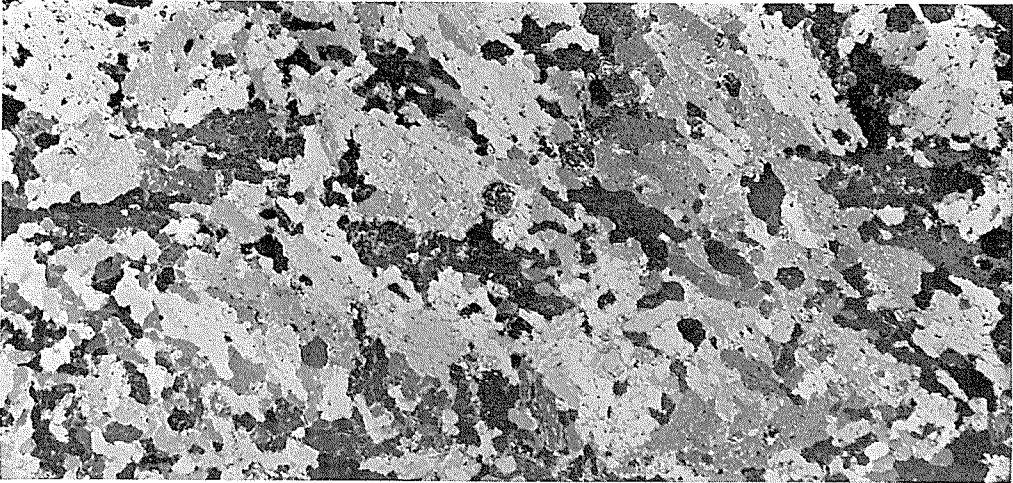
18. Vertical Section (Sample B, 32.5 cm of thickness)

×1



21. Horizontal Section (Sample B)  $s=3\text{ cm}$

×1

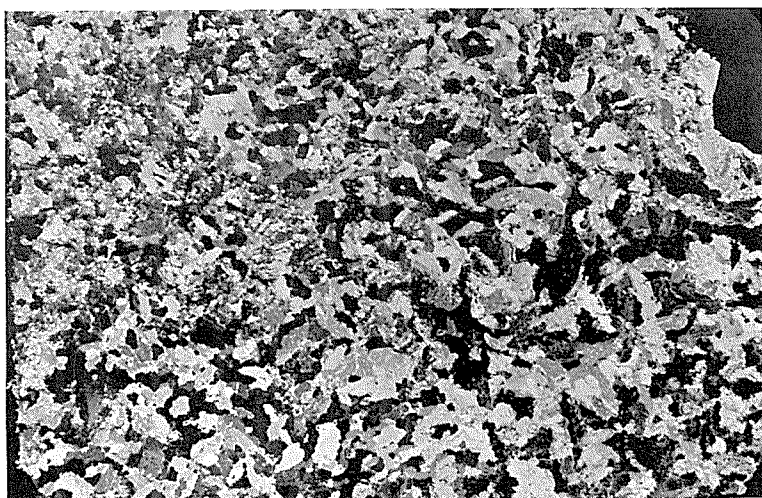




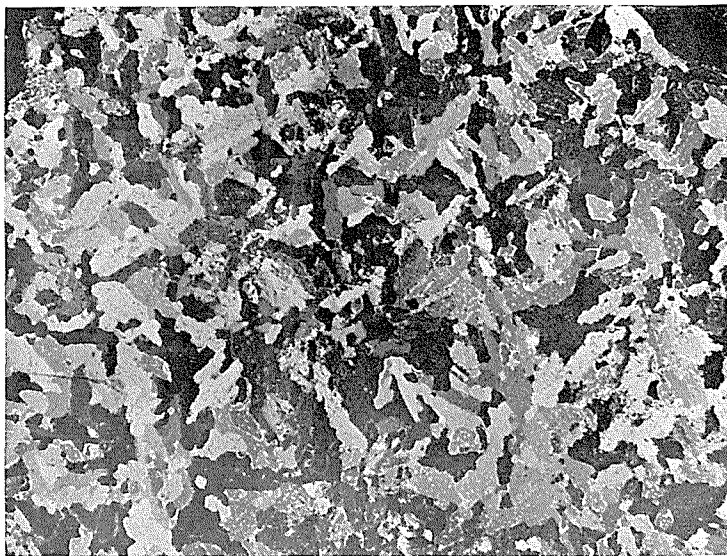
22. Vertical Section  
(Sample C, 14 cm  
of thickness.)  
× 1

←24

←23

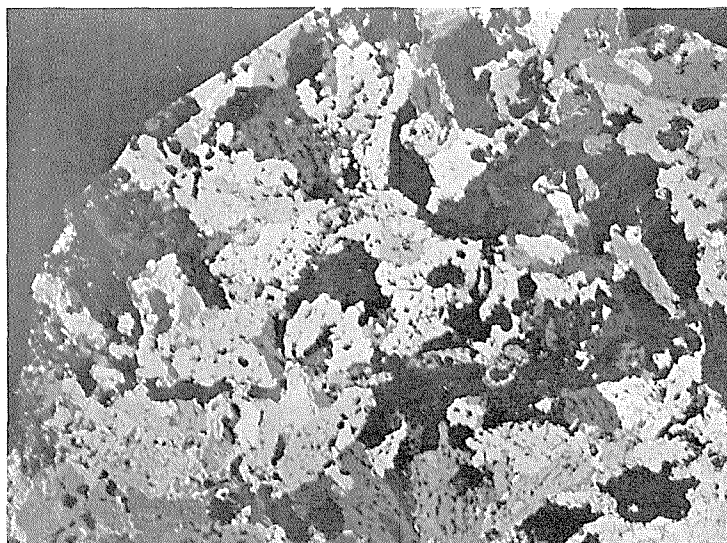


23. Horizontal Section  
(Sample C)  
 $s' = 1.5 \text{ cm}$  × 1



24. Oblique Section (Sample C)

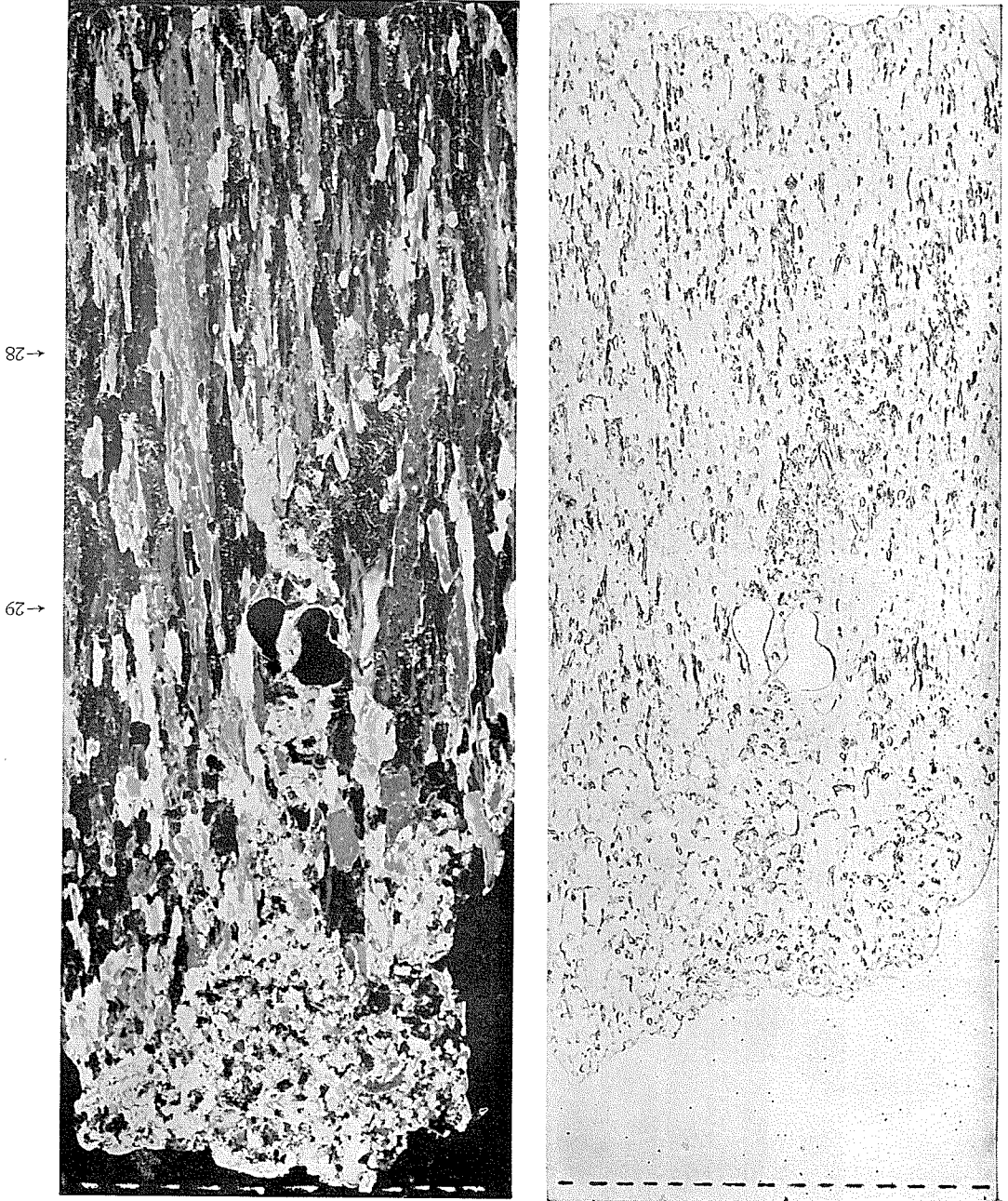
×1

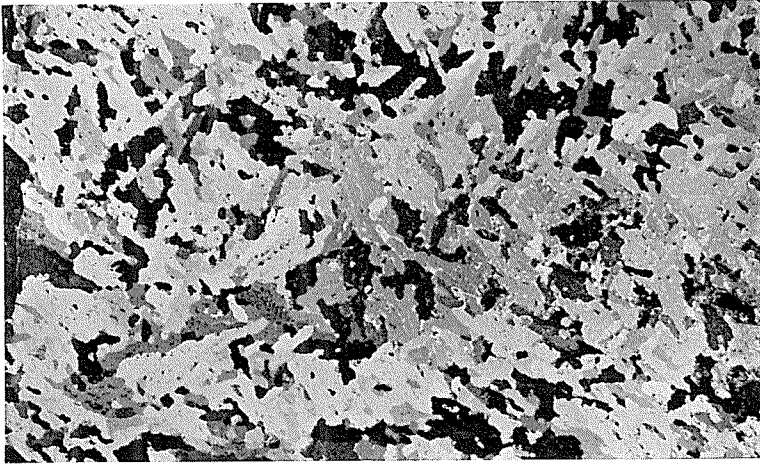


26. Horizontal Section (Sample D)  $s'=6$  cm

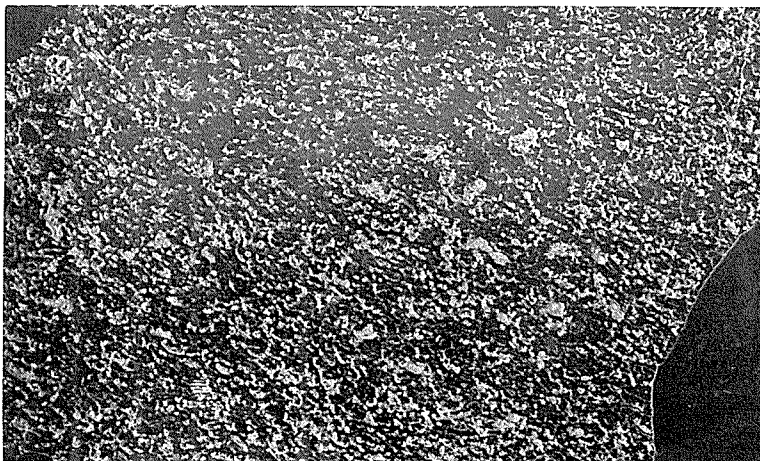
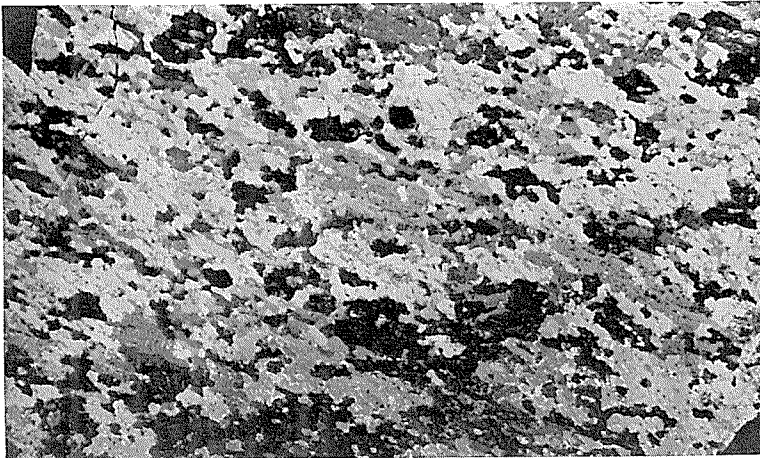
×1

27. Vertical Section (Sample E, 17 cm of thickness) × 1





28. Horizontal Section (Sample E)  $s' = 4.5$  cm  $\times 1$

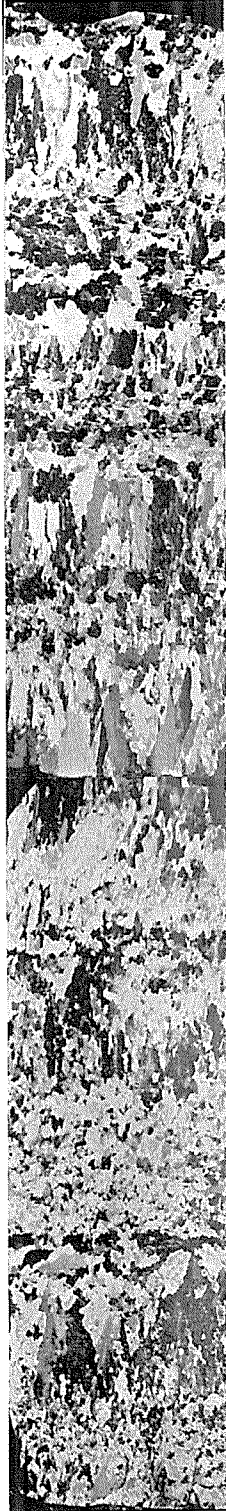


29. Horizontal Section (Sample E)  $s' = 8$  cm  $\times 1$

30. Vertical Section (Central part of Sample F, 35 cm of thickness)

×4/5





25. Vertical Section  
(Sample D, 50 cm of thickness)

×2/5

31. Horizontal Section (Sample F)  
 $s = 13 \text{ cm}$

×1

