

# 北氷洋における底型プランクトン氷 ——北氷洋の一次生産の基本構造としての 海水中の微細藻類の増殖について——

目 黒 熙\*・伊 藤 邦 幸\*\*・福 島 博\*\*

## BOTTOM TYPE 'PLANKTON ICE' IN THE ARCTIC OCEAN

Hiroshi MEGURO,\* Kuniyuki ITO\*\* and Hiroshi FUKUSHIMA\*\*\*

### Abstract

A summer field survey off Point Barrow, Alaska, revealed a growth of photosynthetic diatoms in Arctic sea ice. The diatoms are found in a brine solution in microfissures between ice crystals on the underside of the ice. The chlorophyll content of this layer is 100 times that of the surrounding sea waters. Arctic sea ice is found to be neither a closed

frozen system that disallows transportation of nutrient substances nor a completely inactive biochemical habitat owing to the extremely low temperature. Glaciologically it is a kind of seasonal nutrient metabolism associated with desalinization of sea ice and photosynthesis by diatoms. A considerable fraction of the primary production of the Arctic Sea may occur in sea ice.

### 緒 言

北氷洋はその大部分が 2~4 m に達する海水におおわれ、砕氷船による観測は夏期陸沿いの周辺部に限られていた。ソ連および米国の氷島上の漂流観測も行なわれ、北氷洋中心部もこの氷島による観測が行なわれてきた。

北氷洋は、古来おびただしい鯨、あざらしその他の海獣の生息場として知られてきた。

ENGLISH<sup>1)</sup>等は 1957~58 年氷島上で 1 年以上連続して海水中のクロロフィル量を測定し、7 月および 8 月に最大限 2mg/m<sup>3</sup> のクロロフィルが存在した他は、ほとんど植物性プランク

The field work was supported by a grant from the Arctic Institute of North America under contract with the Office of Naval Research and logistically by Arctic Research Laboratory at Barrow.

A modified version of this paper will be published in English in *Arctic*, Vol. 20, No. 2, June 1967.

\* 東北大学農学部. Faculty of Agriculture, Tohoku University.

\*\* 京都大学医学部. Faculty of Medicine, Kyoto University.

\*\*\* 横浜国立大学生物学教室. Biological Institute, Yokohama Municipal University.

トンを見る事ができず、北氷洋は世界で最も植物性プランクトンの少ない海洋の砂漠と報告した。しかし、この結論は豊富な動物群とまったく矛盾し、その説明として、南方の暖かい海域で生産された有機物が、海流により北氷洋に供給されるという仮説が A. W. JOHNSON<sup>2)</sup>等によって提出された。

我々は<sup>3)</sup> 先に南氷洋 Lützow-Holm 湾沖の浮氷帯において、多量のケイ藻が海水中に増殖し、南氷洋の主要な一次生産の場である事を明らかにし、これをプランクトン氷と名付けた。この層は 1~2 m の 1 年氷上の厚い積雪層に海水が浸透し、シャーベット状の部分に形成されたクロロフィル-a 600 mg/m<sup>3</sup> に達する着色層であった。その後 McMurdo 湾の定着氷で、BUNT<sup>4)</sup> は、海水下部に前記とことなるケイ藻の増殖層を見出し、南氷洋で 2 つの形の着色氷の存在が明らかにされた。また、Palmer 半島沖でも Lützow-Holm 湾沖と同形の着色氷が BURKHOLDER<sup>5)</sup> 等によって確認された。

北氷洋においても Devon 島沖の定着氷に McMurdo 湾と同形のものと思われる海水下部の着色氷が APPOLONIO<sup>6)</sup> によって報告された。

我々は、先の北氷洋の一次生産に関する ENGLISH 等の結論は水層中の植物プランクトンのみ観測し、海水中の一次生産に気がつかなかった結果と考え、北氷洋における海水中の一次生産およびその機構を明らかにする目的で、1964年7月から9月にかけて、Alaska, Barrow 沖の海水の調査を行なった。調査は目黒および伊藤が行ない、ケイ藻の種の同定は福島によりなされた。

本調査により、北氷洋にも南氷洋の底型のプランクトン氷が存在する事、およびこの底型プランクトン氷生成の機構、生活条件を明らかにし、北氷洋においては海水中の生産が基本的な構造である事を明らかにした。

## 調 査

### 1) 沿 岸 氷

Barrow (71°05'N, 157°36'E) の Arctic Research Laboratory 周辺の沿岸氷を7月7日~14日まで北極研究所職員のエスキモー案内人と同行し、徒歩で海氷上を調査した。SIPRE core sampler を用いて 1~3m の厚さの 3 本の柱状標本および海氷表面の変化を観察した。

### 2) 砕氷船による調査

7月15日より8月2日まで、カナダ運輸省の砕氷船 CAMSEL 号により Point Lay (69°46'N, 163°13'E) より Barrow にいたる海水を調査した。またヘリコプターおよびセスナ機に

よる上空からの調査も同期間中に行なった。

航行中砕氷作業に伴い、転倒した底面、および断面の着色層の確認、写真撮影を行なった。

更に SIPRE core sample による柱状標本10本および着色氷断片30点を採集した。また海氷上のパドル水および海氷下の海水を採水した。

## 氷 状

7月15日より8月2日まで同海域は氷量 9/10~10/10 で、ほぼ海氷におおわれ、同期間中正午の最低気温は 0°C、最高気温は 8.2°C であった。氷の厚さは 1~3m で、時に 5~6m の Pressure ridge が見られたが、冰山は見られなかった。

この海域は冬期一面に定着氷として凍結し、通常 8 月には陸より数10マイルまでが海氷面となる地域である。

海氷の表面には多くの円形のプールが散在し、陸から風で運ばれたと思われる土砂により汚れたものも見られた。また海氷上に積雪は認められず、海氷の厚さは均一ではなく、一年氷と思われる 2m 以下の氷、3~4m に達する多年氷、あるいは青味がかった 4~5m に達する極氷がいまじり、まったく多種多様であった。この氷状は南氷洋の浮氷域のほぼ単一の海氷が、厚さも 1~2 m で、表面にはほぼ一定の厚さの積雪層をいただく状況とはことなり、雪のない点では南極海の定着氷の夏期に似ていた。しかし、円型のプールの形は南極定着氷上の風の方向に並んだ細長いパドルとは違っていた。この多種多様な北氷洋の海氷は、恐らくは、南氷洋では海氷は常に極から遠ざかる方向に流出し、完全にとけてしまい、再び戻ってくる事がなく、多年氷はただ岸近くで形成されるのに対し北氷洋では沖に流れた海氷はより寒い極に近づき、再び二年氷または多年氷となって海岸にまで押し寄せるためと考えられる。

北氷洋の海氷の融氷に際して、南氷洋との著しい違いは、陸上から運ばれた土砂による表面の汚染および溶解促進が著しい点である。北氷洋沿岸の陸地は 6 月末には雪が消え、土が露出しその供給源となっている。この土砂による汚染は、海岸より 20 マイルはなれた海氷上でも明らかに認められ、高度 1,000 フィートよりの機上からの観測では、海氷の直線的な亀裂と溶解によるプールの形を明らかに認めることができた (Photo 2)。

### 海氷の処理および分析

氷の標本は採集後冷凍室中で保存し、8月3日後 Barrow の Arctic Research Laboratory に持ち帰り、溶解後直ちに塩素量、溶存リン酸、溶存ケイ酸を測定し、またクロロフィルの濾過固定、検鏡標本のホルマリン固定を行なった。また氷のまま冷凍室中ではなく片にし、顕微鏡写真を撮影した。

- 1) 塩素量は標準海水を標準として、電気伝導度を測定した。
- 2) 溶存リン酸：西条<sup>7)</sup>の方法によりリンモリブ酸アンモニウムによる青色を、Klet-Summerson 光電比色計で測定した。塩濃度の補正は行っていない。
- 3) 溶存ケイ酸：同様の光電比色計によりケイモリブデン酸アンモニウムによる黄色を測定した<sup>7)</sup>。
- 4) クロロフィル-a：氷を溶かした水 200~500ml を No. 2 の濾紙で減圧濾過し、濾紙上に補集した藻体を 5 分間蒸気で固定し、黒紙に包んだデンケーター中に保ち西条<sup>7)</sup>の方法により、含塩酸80%，アセトン抽出後 pheophytin-a を benzine に再抽出し、日立分光光度計によって定量した。
- 5) クロロフィル測定により検出できない量の氷は 5%ホルマリンを加え、帰国後血球計を用いて菌数を測定した。
- 6) 種類同定は着色氷標本をホルマリンで固定したものを帰国後行なった。
- 7) 着色氷の微細構造は、着色氷を冷凍室中ではなく片とし、デッキグラス上に凍結固定させ、顕微鏡写真により行なった。

### 海氷表面およびプール水

1) 海氷表面には円形の水たまりが数多く見られる。この水たまりは昭和基地周辺の定着氷上に数多く見られるパドルで、風向により一定方向に長軸をもつものとは形がことなっている。

直径は小さなものは 1~2 m で大きなものは 20~30 m に達し、発達すると底部の海水と連結する。これ等の円形の池をつなぐ小さな流れおよび 2 つ以上が連なったひょうたん形のものも見られた。

この円形の水たまりは、陸地に近い土砂の汚染の著しい所ほどよく発達する。その円形のプールの底は直径 3 cm 位の無数の小穴の集りで、はちの巣状のものが多く、その 1 つ 1 つ

の小穴の底部に土砂がくいこんでいるのが見られた。この底部に藻類の見られた事もある。一般にはその色は藻類によるものではなく、検鏡によっては多量のケイ藻は見られない。pH は 6.9~7.0 でほぼ中性で表面附近の水温は 5°C を示すものもあった。

塩素量は 0.07~3.31 ‰ で特に海水の流入のない部分は 0.1 以下で、下部の海氷に比して著しく低かった。

溶存リン酸は 0.1  $\mu\text{g-atoms/l}$  以下で、ほぼ検出限界で溶存ケイ酸も 0.3  $\text{mg-atoms/l}$  以下で極端な貧栄養であった。このパドル中では、ほぼ栄養塩が制限因子であると思われる。

2) 海氷中央部は SIPRE core sampler で得られた直径 3 インチの 2~4 m の柱状標本を、20~30cm に適当に切断し、海氷中での垂直分布を測定した。

海氷は垂直方向に走る板状の結晶が見られ、そのすき間が時には数mmに達する細長い空洞のあるものも見られた。一般にはかたく、上部には空気が集まって、白色をおびていた。

断面中ケイ藻の増色による着色氷は、最下面以外には見られず、時々見られる茶色の着色

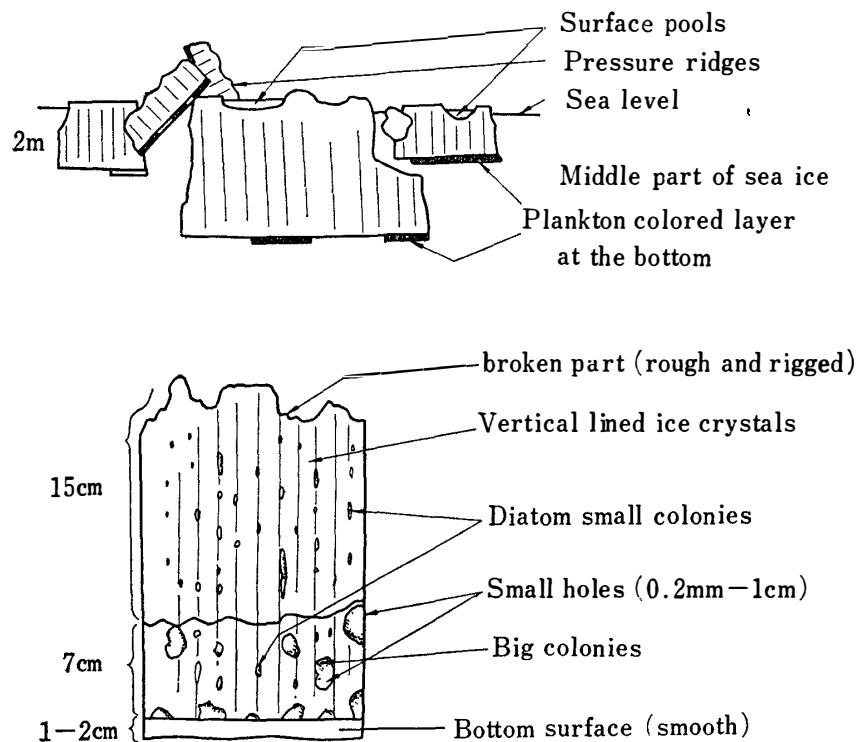


Fig. 1. Sketch of the Arctic sea ice in summer.

(a) Hodgepodge of the Arctic sea ice in summer.

(b) An example of fragments of plankton colored layer at the bottom of sea ice.

層は、ほとんど微細な土砂による着色であった。

7月下旬 SIPRE core sampler では、最下層の着色層は崩れて下に落ちてしまい、極めて困難であった。

塩素量は上部ほどすくなく、0.1‰ 附近で下部ほど増加し、底近くで最大値を示し、1‰ をこえるものもみられた。平均すると、0.92‰と上部パドルよりも大きな値を示した。

溶存リンは平均して  $0.3\mu\text{g-atoms/l}$  と上部パドル水よりやや多い。溶存ケイ酸は  $0.2\text{ mg/l}$  以下できわめて少なく、ケイモリブデン酸比色の限界、もしくはそれ以下であった。ケイ藻の増殖は見られないが、検鏡により凍結時に brine 中にとりこまれたと思われる少量のケイ藻が見られた。この部位のクロロフィル量は  $0.1\text{ mg/m}^3$  以下であった。

### 3) 底部着色氷層（プランクトン増殖層）

砕氷船により砕氷の際見せる断面およびひっくり返した底面には、黄茶色の層が見られ、7月下旬には、同海域のいたる所でこの層が滑落するのが見られた。この層は、前述のように、SIPRE core sampler では比較的颜色のうすい層2本を除いては、柱状標本としては得られなかった。しかし、砕氷の際滑落した断片を拾いあげ、約40点を採集した。この断片は、底面にあたる部分が平滑で、折損部はぎざぎざの断面を示す事と、上下方向に走る長方形の結晶より容易にその方向を再現する事ができた。

この着色部は底面より最大 30 cm、平均して 10~20 cm に達し、その最大着色部は海水に接している底面ではなく 5~10 cm 位奥の部分に見られるものが多く、その中に数 mm のコロニーが結晶の間に点々と見られた。着色氷のクロロフィル量はきわめて多く、最大  $400\mu\text{g/l}$ 、平均して  $120\mu\text{g/l}$  に達し、南氷洋のプランクトン氷よりやや少ないが、周辺の海水中のクロロフィル量の約 100 倍で、普通水中ではほとんど見られない増殖層であった。藻体濾過した濾液中の溶存リン酸は  $0.9\mu\text{g-atoms/l}$  で、上部の海水の 3 倍、また溶存ケイ酸も平均  $0.9\text{ mg/l}$  と同じく上部の海水の 2 倍であった。

しかし、 $120\mu\text{g/l}$  のクロロフィル量のケイ藻の藻体中のリンおよびケイ素の量は、PARSON<sup>7)</sup>等の値より計算すると、それぞれ  $6.5\mu\text{g-atoms/l}$  および  $40\sim60\mu\text{g-atoms/l}$  となり、海水の着色層中に存在する前記の量の 7~8 倍に達した。

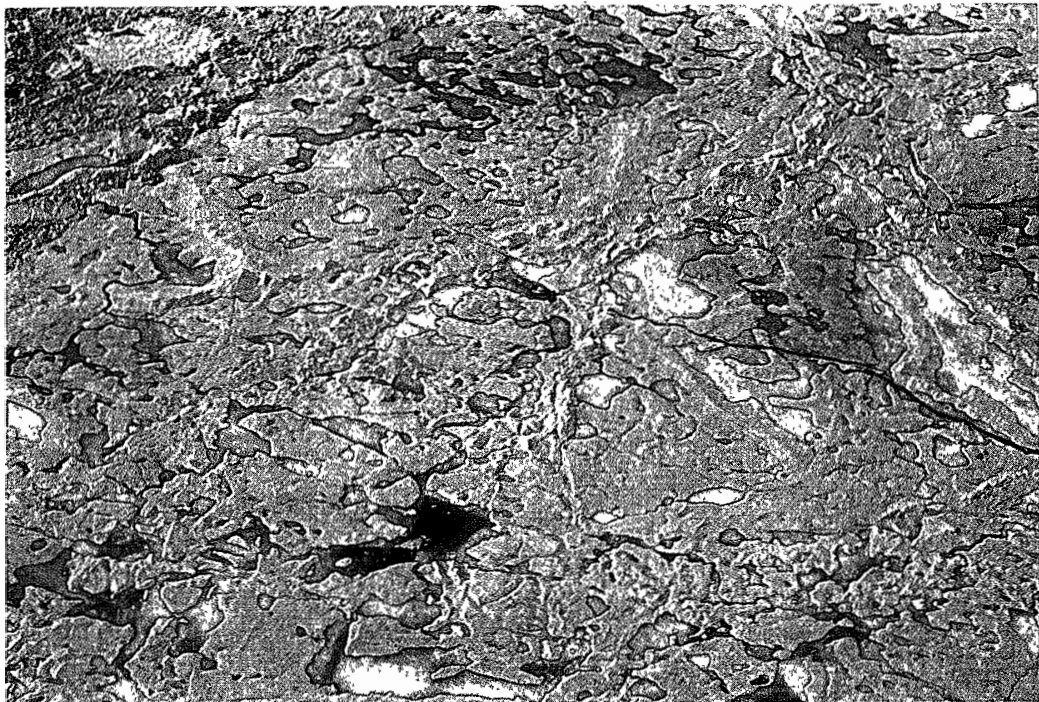
## 海水周辺の表面海水

海水溶解直後の塩素量 4.7‰ の海水と、すでに混合が行なわれて 13.3‰ 位の開水面の海水とを別々に採取した。それぞれのクロロフィル量は、氷のとけたばかりの方は  $3.1\mu\text{g/l}$  と

*Color photographs taken off Point Barrow, Alaska at the end of July 1964.*

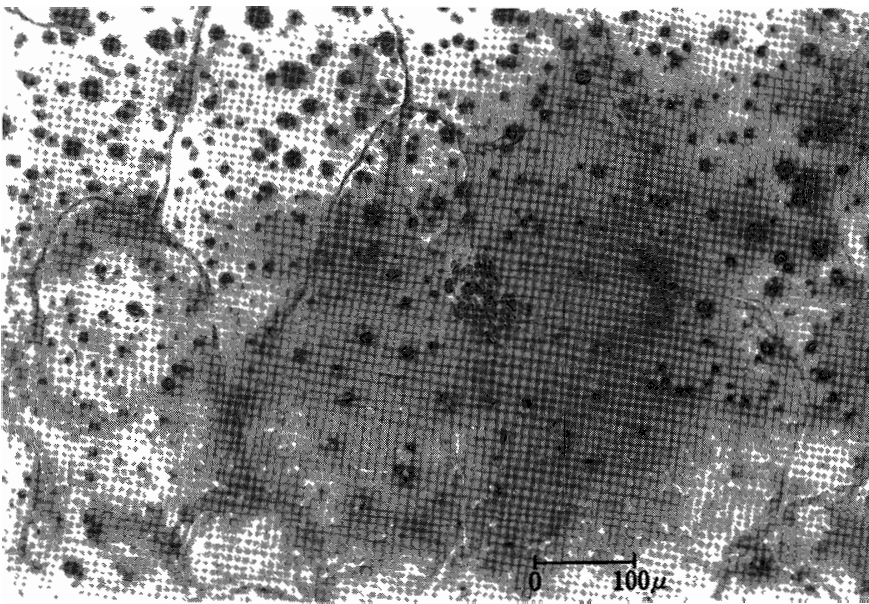


*Photo 1. A profile of summer sea ice (about 2m thick), when the icebreaker split the ice, showing a development of colored layer and its partial degradation at the bottom side.*

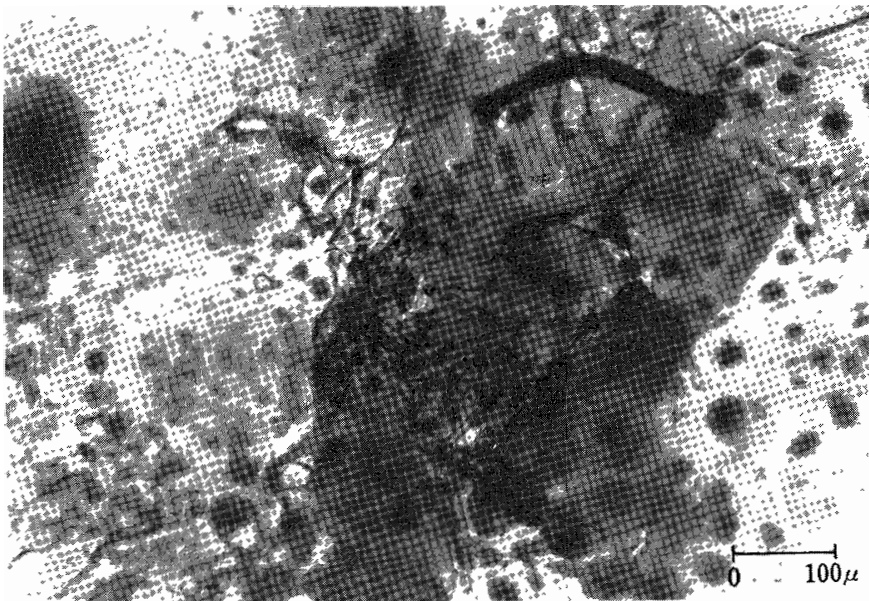


*Photo 2. Characteristic surface round pools on sea ice viewed from the helicopter at the height of 1000 feet. Their diameter ranges from 3 to 30m.*

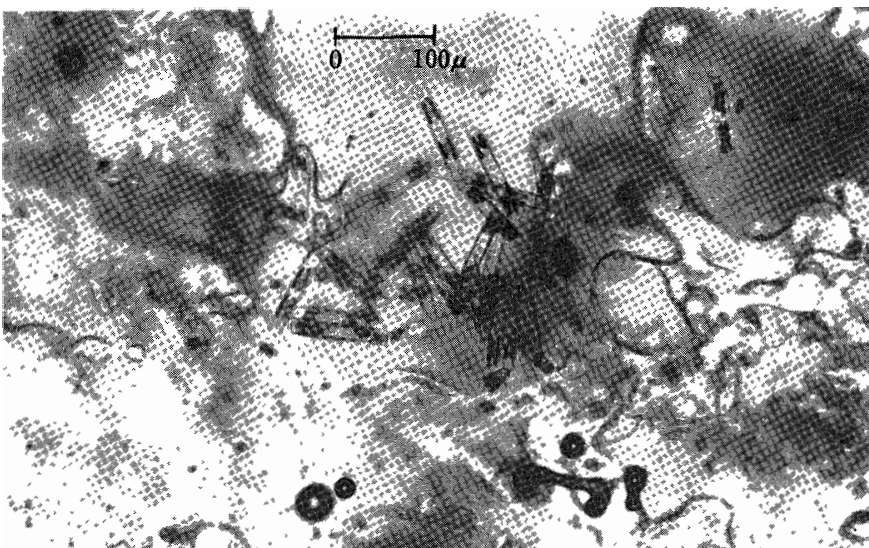




*Photo 3. A young colony of diatom. A bundle of rod at the center is diatoms showing an increase or division from a single cell. Black round shadows are air bubbles and net-shaped lines are boundary of ice crystals.*



*Photo 4. Microfissures between ice crystals full of brine solution and a loose diatom colony in it. Any grazing by zooplankton will be impossible before degradation.*



*Photo 5. Partially melted microbiota of diatoms showing an active living state of individual cells. The particles in cell structures are well recognized.*



かなり高いが、開水面の塩濃度の高い表面海水では  $2.1 \mu\text{g}/l$  であった。この事は海水中の植物プランクトンは、海氷中で増殖したケイ藻が海氷の溶解により、放出された結果と考えられる。溶存リン酸および溶存ケイ酸は、低塩分の方が  $0.3 \mu\text{g-atoms}/l$ ,  $1.5 \mu\text{g-atoms}/l$  と高塩濃度の海水のそれぞれ  $1/2$  および  $1/3$  であった。これ等の栄養塩濃度は、南氷洋の表面海水が溶存リン酸  $2.5 \sim 3.5 \mu\text{g-atoms}/l$ , 溶存ケイ酸が  $30 \sim 50 \mu\text{g-atoms}/l$  に比して非常に少なく、前者は約  $1/30$ , 後者は  $1/10$  にすぎない。

### 光合成と増殖の場としての海氷底部の着色層

Barrow 沖の着色氷は、先に我々が報告した積雪中の表面型プランクトン氷とはその物理的・生物学的環境はことなり、BUNT 等が McMurdo 湾の定着氷中に見出した海氷底部の着色氷と同型と考えられる。しかし、その生成機構については、いまだ研究がなされていない。我々は、便宜上前者を表面型プランクトン氷、後者を底型プランクトン氷と呼び、底型プランクトン氷の生態学的な諸条件に対して考察を行なった。

#### 底型プランクトン氷の微細構造

Photo 3-5 は着色部を氷のままはく片にした顕微鏡写真である。Photo 3 はケイ藻が小コロニーとして分裂増殖している事を示している。大きな網目は海水の結晶の界面で、結晶は写真に対して垂直方向に走っている。黒い小さな丸い影は海氷中のとじこめられた空気の小泡で、中央部の棒を束ねた様な形がケイ藻である。

Photo 4 は海氷の結晶内の液泡に見られるかなり大きなケイ藻のコロニーを示す。これ等同一種類の個体の集団は、明らかに増殖したもので、単に氷中にとらえられたのではない事を示す。

Photo 5 は更に溶解の進んだ大きな液泡中のケイ藻コロニーで、細胞内部の構造、果粒等がはっきりと確認できる。これはこのケイ藻が生活状態にあり、この層の生物がバクテリア等による分解をほとんど受けていない事を示している。これ等の微細構造はケイ藻の生活が海氷中にとじこめられた液泡内で行なわれ、water-in-ice の系である事を示している。

### 温 度

ケイ藻の生活している液泡の温度を直接測定する事は困難である。しかし、この系が塩溶液と氷の結晶との共存系である事から、熱力学的に平衡を保つ系として計算する事ができ

る。

冬が終り、春から夏にかけて日射が始まると、海水内部において氷は溶解を始める。この期間は、ちょうど着色氷の形成期で光合成の可能な期間に相当し、液胞中の温度は、氷の融点  $-1.7^{\circ}\sim 0^{\circ}\text{C}$  に保たれる。一方気温が低下し、海水の温度が低下する場合は、液胞周囲の氷の結晶が生長し、液胞の塩濃度を増加させる。その温度と塩濃度の関係は、熱力学的には塩類による溶液の氷点降下の式で表わされる。その結果、もし温度が決れば塩濃度および浸透圧を計算する事ができる。このような塩と氷と水との共存系では熱エネルギーが取り去られる時には温度変化は非常にせまいが、溶液の塩濃度および浸透圧の変化は非常に大きい。

冬期および気温が低く海水の厚さが増加しつつある時の液胞内の浸透圧 および 温度変化は、海水の表面の部分と底面の海水に近い部分とは非常に異なる。表面はほぼ気温に近く、気温が  $-20^{\circ}\text{C}$  を下まわる時には、その浸透圧は食塩の共晶点に近くなる。しかし、底面附近の温度はほぼ下の海水の温度  $-1.7^{\circ}\sim 1.8^{\circ}\text{C}$  であり、気温が  $-20^{\circ}\text{C}$  以下となる極地の冬としては温暖な条件下に保たれる。

従って、海水の底面近く 30cm 位のいわゆる夏期着色氷の形成される層では、海水凍結時に brine と共にとりこまれた植物性プランクトンの種子は、比較的暖かい環境で越冬する事ができると考えられる。

Table 1 は三宅等<sup>8)</sup> によって提出された海水の塩分量と氷結温度の式によって求めた冬期のプランクトン着色層の温度変化と塩分量の推定値である。

Table 1. Physical and chemical environment of brine cells near the bottom of sea ice in winter.

Distance from the bottom of sea ice	Temperature $^{\circ}\text{C}$	Salinity ‰	Phosphate-P P mg/l	Silicate-Si $\text{SiO}_2$ mg/l	Osmotic pressure Atom
5 cm	-1.75	18.0	0.18	2.74	ca 20
10 cm	-2.61	26.2	0.26	4.0	
30 cm	-4.45	44.7	0.45	6.8	ca 70

The values are calculated on the following assumptions:

1. Thickness of the sea ice is 2m.
2. Air temperature is  $-20^{\circ}\text{C}$ .
3. Water temperature under the ice is  $-1.7^{\circ}\text{C}$ .
4. Heat conductivity of the ice is vertically constant.
5. The relative concentration of phosphate and silicate to salinity is the same as that of sea ice in August.

$$T = -55S$$

$S$  = salinity

grams of salt per gram of sea water

$T$  = freezing point °C

### 栄 養 塩

120 $\mu\text{g}/\text{l}$  のクロロフィルを持つ着色層に増殖した藻体中のリンおよびケイ素は, Table 2 に示したように, リンとして 6.5  $\mu\text{g-atoms}/\text{l}$ , ケイ素としては 40~60  $\mu\text{g-atoms}/\text{l}$  に達する。

しかし, 海氷中の栄養塩濃度はそれぞれ 0.3~0.9 $\mu\text{g-atoms}/\text{l}$ , 2~15 $\mu\text{g-atoms}/\text{l}$  にすぎず, この層は凍った独立した系ではなく, 他からの栄養塩の移動供給の可能な系でなければならない。

南氷洋の表面型プランクトン氷において, 栄養塩は多孔質の積雪層に南氷洋の栄養塩濃度の高い海水が浸透する事で, 充分に栄養塩供給の機構を量的に説明し得た。しかし, 底型プ

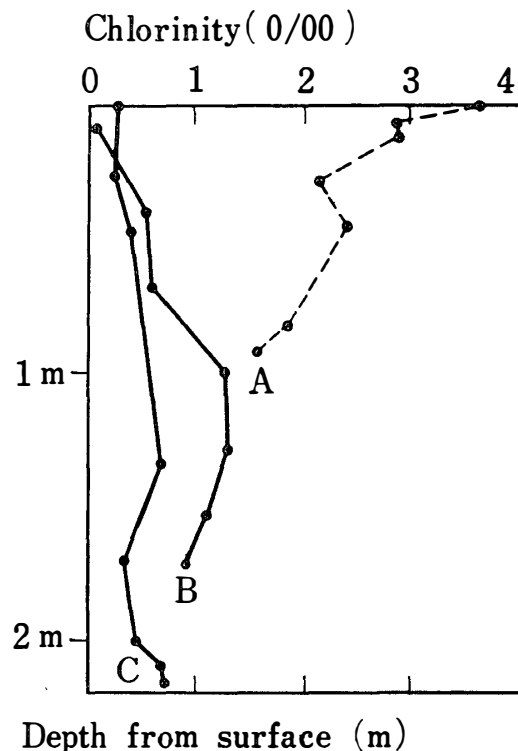


Fig. 2. Vertical distribution of chlorinity in the Arctic sea ice. Seasonal change from April to July showing descending brine in ice.

A. According to MALMGREN et al.,<sup>10)</sup> April.

B. Barrow (71°20'N, 156°46'E), July 11, 1964.

C. Wainwright (70°57'N, 158°58'E), July 31, 1964.

Table 2. Chlorophyll-a and nutrient salts concentration of plankton colored layer at the bottom of sea ice.

Sampling date	Chlorophyll-a $\mu\text{g/l}$	Chlorinity ‰	Phosphate-P P mg/l	Silicate-Si Si $\text{O}_2$ mg/l
July 27, 1964	180	2.8	0.075	1.5
	221	1.6	0.07	2.1
	91.5	0.62	0.025	0.5
	93.6	1.4	0.07	0.8
	251.0	2.6	0.01	2.1
	427	—	—	—
	41.0	1.1	0.01	0.7
	36.4	0.25	0.01	0.4
July 29, 1964	33.0	0.59	0.01	0.6
	72.0	0.59	0.02	1.0
	62.7	0.64	0.01	0.8
	118	0.12	0.02	0.8
	47.0	1.8	0.01	0.4
	10.2	0.55	0.01	0.4
Average	120.3	1.13	0.027	0.93

Location of sampling: Off Wainwright, Alaska, Lat.  $70^{\circ}55'N$ , Long.  $159^{\circ}12'E$ .

Table 3. Average content of chlorophyll-a and nutrient elements in various parts of sea ice and sea water collected off Barrow in July and August, 1964.

	Chlorophyll-a $\mu\text{g/l}$	Chlorinity ‰	Phosphorous P $\mu\text{g/l}$		Silicone Si mg/l	
			$\text{PO}_4\text{-P}$	*Diatom-P	Silicate-Si	*Diatom-Si
Pool water at the surface of sea ice	0.3	0.79	2	0.5	0.12	0.006-0.009
Middle part of sea ice	0.0	0.92	9.3	0.0	0.07	0.0
Plankton colored layer at the bottom of sea ice	120	1.13	27	204	0.44	2.4-3.7
Sea water just after sea ice melting	3.1	4.71	10	5.3	0.05	0.06-0.09
Sea water in open lead	2.1	13.3	17	3.6	0.14	0.04-0.06

\* Diatom-P and Diatom-Si are the respective elements composing diatoms. The values are calculated from the chlorophyll-a content of the samples according to PARSONS *et al.* <sup>7)</sup>.

(P/ch-a=1.7 and Si/ch-a=9.4 in *Coscinodiscus* sp., P/ch-a=1.7, Si/ch-a=14.3 in *Skeletonema Costatum*.)

ランクトン氷においては、氷はかたく直接的な供給ははるかに制約されている。またその最大着色部が底の表面ではなく、表面より数 cm 奥の方に見られる事は、直接に接触した海水からの吸収のみでは充分説明し得ない。我々はこの栄養塩の供給形式として次の上部の海水中に冬期とりこまれた栄養塩の利用という形式によるものと推定している。

Fig. 2 に MALMGREN等<sup>9)</sup> が4月に北氷洋において測定した海水の塩分の垂直分布と、我々が7月末に得た海水との比較を示した。夏期の塩素量の平均は0.9‰で、しかも海水上部ほど少ない。これに比して、4月の海水は、平均2.4‰で海水上部ほど高い。この海水の塩分の変化は冬期の凍り始めほど海水の成長が早く、多くの海水を brine としてとりこみ、氷が厚くなると氷の成長は比較的小さくなり、brine のとりこみもすくなくなる。この結果4月の氷は上部に塩素量高く、底部にゆくに従い減少する。一方春から夏にかけてとりこまれた brine は、氷の結晶の間を通過して徐々に下降し、海水の底部から塩分が放出され、夏の低塩分の海水に変化する。

可溶性リン酸、ケイ酸等の栄養酸も当然塩類として同様な行動をとるとすれば、凍結時に海水にとりこまれた栄養塩は、海水の脱塩に伴って海水底部のケイ藻に供給され得る。厚さ2.5m の氷でこのようにして移動するリン酸塩の計算値は次の通りである。

$$\begin{aligned} \text{1m}^2 \text{ 当り供給リン酸} &= \frac{\text{夏の海水中のリン酸}}{\text{mg-atoms/m}^3} \times \frac{\text{4月の塩素量} - \text{夏の塩素量}}{\text{夏の塩素量} (\text{‰})} \times 2.5\text{m} \\ &= 0.3 \times \frac{2.4 - 0.92}{0.92} \times 2.5 \approx 1.3 \text{ mg-atoms/m}^2 \end{aligned}$$

このリン酸量は、クロロフィル 120 $\mu\text{g/l}$  の層が、厚さ 20cm の時の必要リン酸 1.3mg-atoms/m<sup>2</sup> ときわめてよく一致する。しかし、この形以外に表面からの直接浸透による供給も、特に崩壊寸前の着色氷および表面附近では行なわれていないとは断言できない。

全体として着色氷の厚さとクロロフィル量は、上記の栄養塩供給が一つの制限因子となつて約 20~30cm の厚さにとどまっていると思われる。

### 光 線 の 供 給

海水下の海水層に比して海水中の生物のもち得る優位は、光合成における光の供給である。

LITTLEPAGE<sup>11)</sup> は、南極 McMurdo 湾の 3m の海水下の観測では、海水表面のはば 1% の光が到達すると報告している。表面型プランクトン氷においては大体 25% 位が到達するのに比して、底型プランクトン氷の光の供給は非常に少ない。

John C. REEDによれば、北氷洋においては光の供給は4月中旬から8月中旬までの4カ月間が日照の行なわれる期間で、日照の最大は6月中旬である。しかし、最高気温はそれよりも1カ月ずれて7月中旬、海氷がもっともうすくなるときは、更に1カ月おくらせて8月下旬から9月の初めである。

このような気候および日照条件下では光の経済的利用の面から、海氷内の光合成は海水下の海水に比して有利であると考えられる。

### 着色層の選択的崩壊

海氷中の着色層は、夏期には上部の氷に比して柔かく、海氷の他の部分に先だって崩壊し、

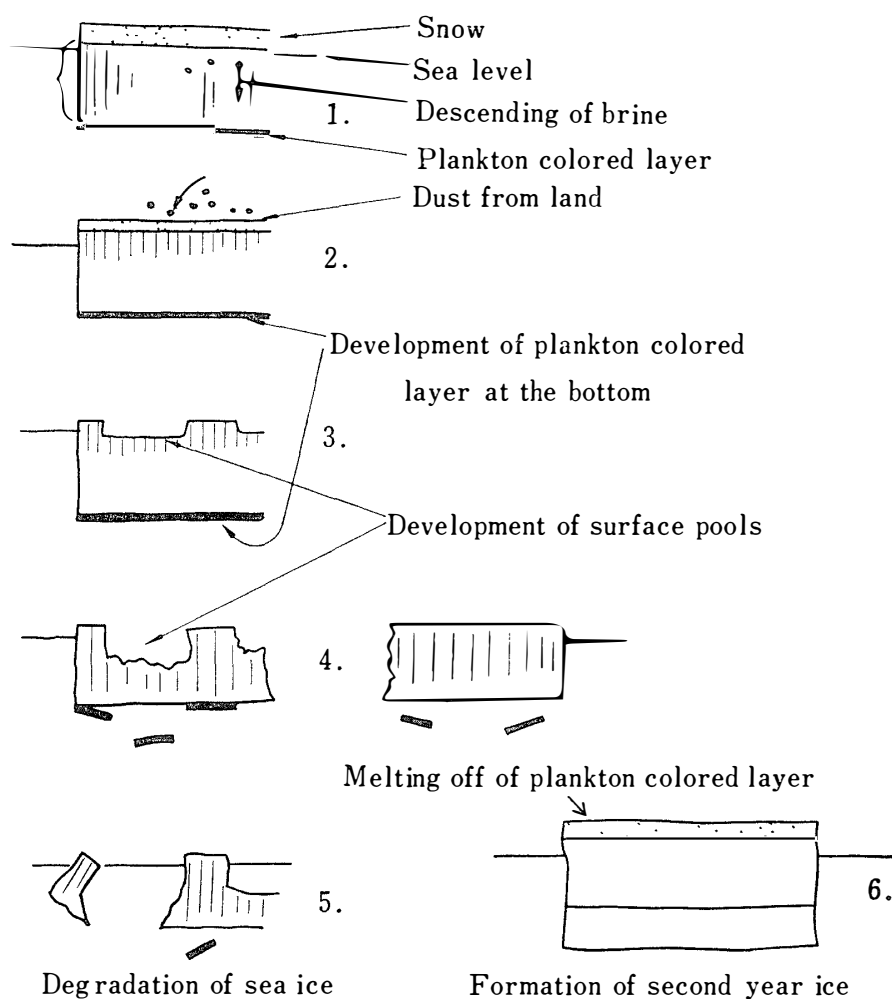


Fig. 3. A presented mechanism of sea ice degradation in the Arctic. Development of plankton colored layer at the bottom and dust precipitated pools at the surface.

蓄積したケイ藻群落を海中に放出する。

この放出は砕氷船による砕氷の衝撃によってもよく見られ、また、大風のあとでは、海水中に多くの着色氷が破片となって浮遊しているのが7月27日および29日に観測された。この放出は比較的短期間に行なわれるものと考えられる。

夏期は海氷の表面から溶解が始まると、海氷内温度勾配は消失して、海氷底部では海水の温度  $-1.7^{\circ}\sim 0^{\circ}\text{C}$  になり、また海氷表面の温度もほぼ氷の融点  $-1.7^{\circ}\text{C}$  になる。その結果氷の内部への熱の移動は伝導によって行なわれず、もっぱら輻射とその吸収によって行なわれる。植物の増殖によって色素を蓄積した着色層は、他の部分より多くの光を吸収し、着色部分の選択的溶解が行なわれる。

この着色層の崩壊が毎年行なわれる事は、着色氷の形成が毎年行なわれる事とあいまって、ケイ藻が水中—氷中増殖—水中放出という一つの生活環を形作る点で非常に注目すべきことと考えられる。

また北氷洋の中央部のように、夏期にも開水面にならない永久浮氷域でも、この形式による着色氷の形成、放出の機構は存在し得る。

## 捕 食

光と共に海氷内におけるケイ藻が水中の数百倍にまで達する事の理由の一つは、動物性プランクトンによる捕食が行なわれ難い点にある。海氷の結晶間の液胞はきわめて小さく、ケイ藻に比べて大型の動物性プランクトンは、ほとんど進入し得ない。また、Photo 5に示すように海氷の着色層中に見出されるケイ藻の内部の細胞構造は、ほとんど完全に保持されており、細菌による有機物の分解はきわめて制限されていると思われる。

この事は着色層中に蓄積された有機物は、ほぼその年度の純生産量と考えられる。

即ち、北氷洋の一次生産の特長は、海氷中において、春から夏にかけて、動物性プランクトンにより捕食される事なく行なわれ、かくして蓄積された大量の有機物を、着色氷が崩落する時に一時に放出し、それを捕食する動物群もまた短期間に急激に増加するという独特な型を示す。このような機構によって、従来の北氷洋において見られた一次生産と二次生産の関係は無理なく説明する事ができる。

## 着 色 氷 中 の 藻 類

着色氷中に増殖する藻類は、従来北氷洋の海水に浮遊中確認されているものと同じ種類の



ケイ藻である。この中にはいわゆる新種は含まれていない。

*Navicula* 9種, *Pinnularia* 7種, *Pleurosigma* 1種がすでに同定されている。これらの生理実験は行なわなかったが、これ等はほとんど紡錘型のものであり、氷中における浸透圧変化、低照度等に適應しているものと思われる。

ケイ藻以外の藻類が含まれない事は注目し得る。北極の海氷中に見出されたケイソウは次の通りである。

*Navicula valida*

*N. gracilis* var. *inaequalis*

*N. transitans* var. *erosa*

*N. transitans* var. *derasa*

*N. transitans*

*N. algida*

*N. obtusa*

*N. kjellmanii*

*N. crucigeroides*

*Pinnularia quadratarea* var. *stuxbergii*

*P. quadratarea* var. *biconstricta*

*P. semiinflata*

*P. semiinflata* var. *decipiens*

*P. quadratarea* var. *constricta*

*P. quadratarea* var. *capitata*

*P. quadratarea* var. *constricta* f. *intrrupta*

*Pleurosigma stuxbergii* var. *rhomboides*

### 北氷洋における着色氷の分布

CAMSEL 号の DAVIDSON 船長の話では、夏期における北氷洋の西北航路では、ほとんどすべての海域で同様な現象が見られると述べている事、および我々が乗船した Point Lay～Barrow 間の浮氷域ではほぼ全域にわたって着色氷が観察された事、およびその形成の気候条件等から考えて、底型プランクトン氷は北氷洋の一次生産の基本的形式と考えられる。もし我々の平均値  $120\mu\text{g chlorophyl-a/l}$ 、厚さ 20cm から計算すると、 $1\text{m}^2$  当り 24mg のクロロフィルが海氷中に存在し、これが春から夏までの純生産として考えられる。

また、北氷洋の着色氷が南氷洋の定着氷帯において見られる底型のプランクトン氷と似ている事、および両者は積雪量の少ない点で一致する事等興味深い。また積雪量の多い南氷洋

の一年氷帯で見られた表面型プランクトン氷は, Barrow 沖では見られなかった。

なお, この報文の速報はすでに Science<sup>13)</sup> で報告した。

## 謝 辞

本研究にあたり, 菅原 健教授, 三宅泰雄教授に暖かい御指導いただき, 鳥居鉄也, 守田康太郎, 楠 宏の諸博士に野外調査, および本遠征の実現にあたり御指導御助力をいただいた。また熊井 基博士には氷の顕微鏡写真の指導を, 都留義之氏には隊員として野外調査を助けていただいた。

## 文 献

- 1) ENGLISH, T. S.: Proceedings of the Arctic Basin Symposium (Arctic Institute of North America, Washington D. C., 1963) 213, 1963.
- 2) JOHNSON, A. W.: Proceedings of the Arctic Basin Symposium. 173, 1963.
- 3) MEGURO, H.: Antarctic Rec., **14**, 1192, 1962.
- 4) BUNT, J. S.: Nature, **199**, 1254, 1963.
- 5) BURKHOLDER, P. R. and E. F. MANDELLI: Science, **149**, 872, 1965.
- 6) APPLONIO, S.: Arctic, **14**, 197, 1961.
- 7) 西条八束: 湖沼調査法, 232, 1964.
- 8) MIYAKE, Y.: J. chem. Soc. Japan, **14**, 197, 1939.
- 9) PARSON, T. R. *et al.*: J. Fish Res. Bd Can., **18**, 1001, 1961.
- 10) MALMGREN, F.: The Oceans, ed by Sverdrup, M. W. Johnson and H. Fleming, p. 218 Prentice-Hall, Englewood, 1942.
- 11) LITTLEPAGE, J. L.: Antarctic Res. Ser., **5**, 1, 1965.
- 12) REED, J. C.: U. S. Geological Survey Professional Paper, **301**.
- 13) MEGURO, H., K. ITO and H. FUKUSHIMA: Science, **152**, 1089, 1966.

(1967年1月26日受理)