

## 2004-05 年夏季のオングル海峡定着氷下における 植物プランクトンと栄養塩の時系列変化

大槻晃久\*・小達恒夫・工藤 栄・福地光男<sup>1</sup>

### Temporal changes of phytoplankton and nutrients under the fast ice in the Ongul Strait during the austral summer of 2004/05

Akihisa S. Otsuki\*, Tsuneo Odate, Sakae Kudoh and Mitsuo Fukuchi<sup>1</sup>

(2006 年 5 月 16 日受付; 2006 年 9 月 5 日受理)

**Abstract:** Time series oceanographic observation was carried out in Ongul Strait during the austral summer of 2004/05 in order to clarify the reason why dense chlorophyll *a* can exist under fast ice where the light condition is unfavorable for ordinary phytoplankton.

Chlorophyll *a* concentration observed in this study was smaller than that previously reported, and the maximum was 7.6 mg/m<sup>3</sup>. However, the decrease of nitrate and phosphate concentration in surface water during the observation period was large, and primary production under the fast ice seemed to be active. At the same time, a northward surface current of 4.4 cm/s was observed under the fast ice. Therefore, the water mass in Ongul Strait is believed to have been about 30 km south of the strait 8 days earlier.

The fast ice in the Sôya coastal area in southeastern Lützw-Holm Bay melts earlier than that around Ongul Strait. Underwater light intensity increases and a favorable condition for multiplication of phytoplankton exists in early summer.

Consequently, it is believed that the high biomass of phytoplankton observed under fast ice in the Ongul Strait increased in open water and under thin ice in the southern area (off the Sôya Coast area) and was transported northward by the current.

**要旨:** 弱光環境の定着氷下で高濃度のクロロフィル *a* が存在する要因を明らかにするため、2004-05 年夏季にオングル海峡にて海洋観測を行った。

観測されたクロロフィル *a* 濃度は、これまで報告された値より小さく、最大で 7.6 mg/m<sup>3</sup> であった。しかし、観測期間中の表層の硝酸塩、リン酸塩の減少量は大きく、定着氷下の一次生産は活発であったと考えられる。一方、定着氷下の流向及び流速は、概ね北向きに平均 4.4 cm/s の流れが存在した。それゆえオングル海峡の定着氷下の水塊は、8 日間前には約 30 km 南方の海域に存在したと考えられる。リュツォ・ホルム湾宗谷海岸の定着氷は、オングル海峡周辺より融解が早く、海中光量が増加して植物プランクトンの増殖できる環境が早く整う。

したがってオングル海峡の定着氷下で観測される多量の植物プランクトンは、宗谷海岸沖の開水面域・薄水域で増殖し、海流に乗って輸送され存在する可能性が考えられる。

<sup>1</sup> 情報・システム研究機構国立極地研究所. National Institute of Polar Research, Research Organization of Information and Systems, Kaga 1-chome, Itabashi-ku, Tokyo 173-8515.

\* Corresponding author. E-mail: otsuki@nipr.ac.jp

## 1. はじめに

海水はアイスアルジーにすみやすい環境を提供する一方で、太陽光をその表面で反射・散乱して海中へ透過しにくくするため、海水中の植物プランクトンにとっては一次生産を阻害する物体と考えられる。しかし、星合（1969）などの昭和基地周辺での観測においては、夏季の定着氷下で  $10 \text{ mg/m}^3$  を越える高濃度のクロロフィル *a* がしばしば観測されている。定着氷下の一次生産は、南極大陸沿岸域における物質循環や食物連鎖を通じて周辺で繁殖するアザラシやペンギンなどの大型動物の生態にも影響を与えるので、その仕組みや海水の状態との関係を明らかにすることは重要である。

南大洋外洋域の海水の分布と植物プランクトンの一次生産との関連については、様々な研究がなされている。一方、夏の終わりまで融解せず船舶による観測が困難な定着氷域の一次生産については、より強く海水の性質に影響されると考えられるものの、研究例が少なく不明な点が多い。また海水が存在するため衛星のセンサーによる海洋表層の植物プランクトン量のモニタリングが不可能であり、定着氷上に出向いての現場での観測が欠かせない。

そこで日本南極地域観測隊では、第46次隊から4年計画で夏季の昭和基地周辺の定着氷域において、クロロフィル *a* 濃度、水温、塩分、栄養塩濃度、流向・流速などの海洋観測を集中的に行い、定着氷の性質と一次生産の規模や様式との間に関係を見出す研究プロジェクトを開始した。本研究はその1年目の観測結果をまとめたものである。

## 2. データと方法

昭和基地東方のオングル海峡の定着氷に穴を開けて観測定点を設け（図1）、2-3日おき

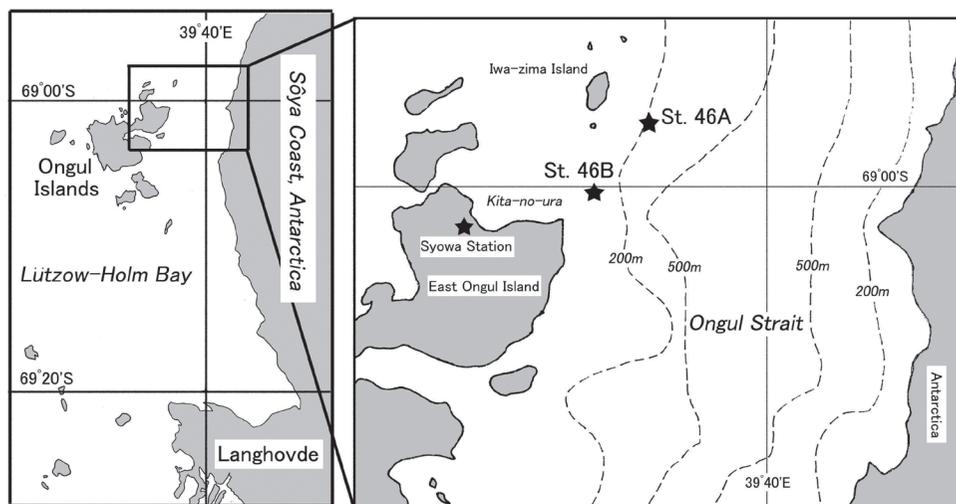


図1 オングル海峡の定着氷上における観測点の位置。

Fig. 1. Locations of sampling stations on fast ice in the Ongul Strait, Antarctica.

に海底までのCTD観測(Sea bird SBE-19)と、水深50 mまで5層の鉛直採水(2 m, 10 m, 20 m, 30 m, 50 m)を行い、クロロフィル $a$ 濃度及び栄養塩測定用試料を採取した。2004年12月23日から、St. 46A(68°59.774 S, 39°37.870 E, 水深200 m, 氷厚110 cm)にて観測を行ったが、周囲のパドルが増えて観測の継続が困難になったので、St. 46Aは12月29日で観測を取り止めた。その後2005年1月3日にやや昭和基地寄りの定着氷上に、St. 46B(69°00.034 S, 39°37.007 E, 水深117 m, 氷厚150 cm)を設け、定着氷が大きく融解して観測点へのアプローチが困難となった1月25日まで観測を継続した。

栄養塩測定用海水試料は、10 mlプラスチックチューブに入れて-20℃以下で凍結保存し、2月に復路の船内で室温にて融解の後、オートアナライザー(BRAN+LUEBBE, TRAACS-800)で測定を行った。測定項目は、リン酸塩、ケイ酸塩、硝酸塩及び亜硝酸塩で、リン酸塩はStrickland and Parsons(1972)、ケイ酸塩は本水・是近(1988)、硝酸塩及び亜硝酸塩はBergamin *et al.*(1978)、Anderson(1979)及びGine *et al.*(1980)の方法によって測定を行った。

クロロフィル $a$ 測定用試料は、海水50-250 mlをGF/Fフィルター及び10  $\mu$ mヌクレポアフィルターでろ過したのち、*N, N*-dimethylformamide(DMF)6 mlで抽出して-20℃以下で保存した(Suzuki and Ishimaru, 1990)。測定は栄養塩と同じく復路の船内で、ターナー式蛍光光度計にて測定を行った。GF/Fフィルターで測定されたクロロフィル $a$ を全クロロフィル $a$ とする。

さらに両観測点においては水深10 mに定着氷上から小型電磁流速計(アレック電子COMPACT-EM)をつり下ろし、流向と流速の連続観測を行った。

なお、第4章議論と考察の中では、沿岸定着氷域における栄養塩動態の特徴をより明確にするため、同じ第46次隊で海上保安庁海洋情報部により観測された南大洋外洋域(64°S, 50-150°E)の栄養塩濃度データを比較に用いている。こちらのデータの詳細については、JARE Data Reports, No. 295(Ogata and Suzuki, 2006)を参照されたい。

### 3. 結 果

#### 3.1. 水温・塩分・栄養塩

観測途中に観測点はSt. 46AからSt. 46Bへと移動したが、水温-塩分関係図をみると(図2)、水深20 m以深の水温・塩分の性質がほぼ同一なので、両観測点の水塊は一樣と考え、2004年12月下旬のSt. 46Aのデータと翌年1月のSt. 46Bにおけるデータを、連続的にとらえて議論を行う。

観測期間中の水温、塩分、クロロフィル $a$ 濃度、硝酸塩濃度、リン酸塩濃度、ケイ酸塩濃度の時系列変化を図3に示す。なお、亜硝酸塩濃度は概ね0.1  $\mu$ M以下(最大0.15  $\mu$ M)であったので、本論文では栄養塩としての窒素源は硝酸塩のみを考えることとする。2004年12月

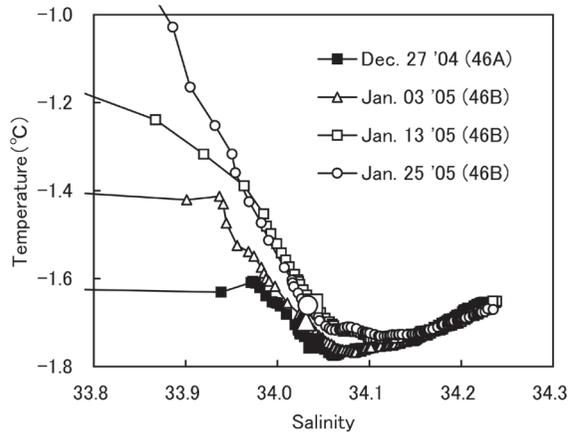


図 2 2004 年 12 月から 2005 年 1 月にかけての T-S ダイアグラムの経時変化。  
大きなマークは水深 20 m におけるデータを示す。

Fig. 2. Time series T-S diagram between December 2004–January 2005. Large marks represent data at 20 m depth.

下旬から 2005 年 1 月下旬へと、20 m 以浅で水温上昇が見られ、表層がやや成層化している傾向がみられる。塩分はもっとも低いときで 1 月 13 日に水深 2 m で 32.64 ‰、そのときの海水の密度は  $26.24 \sigma_{\theta}$  であり、海水が多量に融解するなどして、表層が極度に低塩分化した様子は観測されなかった (図 3b)。

栄養塩は硝酸塩及びリン酸塩濃度が 12 月 27 日のそれぞれ 26.1–30.5, 1.77–2.07  $\mu\text{M}$  から、時間の経過に伴って表層で次第に減少しており (図 3d, e), 1 月 25 日には水深 2 m でそれぞれ 0.3, 0.22  $\mu\text{M}$  と枯渇に近い状態となった。

このように硝酸塩, リン酸塩の減少が大きい一方で, ケイ酸塩の減少は小さく (図 3f), 水深 2 m で比較すると, 12 月 27 日が 54.5  $\mu\text{M}$  に対し, 1 月 25 日が 49.6  $\mu\text{M}$  と 1 割程度の減少に留まっていた。

### 3.2. クロロフィル $a$

クロロフィル  $a$  濃度 (GF/F フィルターでろ過した全量) は, 時間の経過に伴い次第に増え, 観測期間中の最大濃度は 1 月 18 日の水深 2 m で 7.6  $\text{mg}/\text{m}^3$  であった (図 3c)。これは過去にオングル海峡で観測されたクロロフィル  $a$  濃度の各観測期間中の最大値と比較して, やや小さな値である (表 1)。なお, クロロフィル  $a$  は単純には増加せず, 約 1 週間ごとに増減を繰り返すようすが見られた (図 3c)。水深 0–50 m の単位面積当たりのクロロフィル  $a$  濃度積算値 (図 4a) は, 100  $\text{mg}/\text{m}^2$  以上まで増えたのち, 40  $\text{mg}/\text{m}^2$  以下まで減少する状況が繰り返された。一方, フェオ色素の積算値 (水深 0–50 m) は, 1 月に入ってから 40–60  $\text{mg}/\text{m}^2$  で, 比較的一定であった (図 4b)。

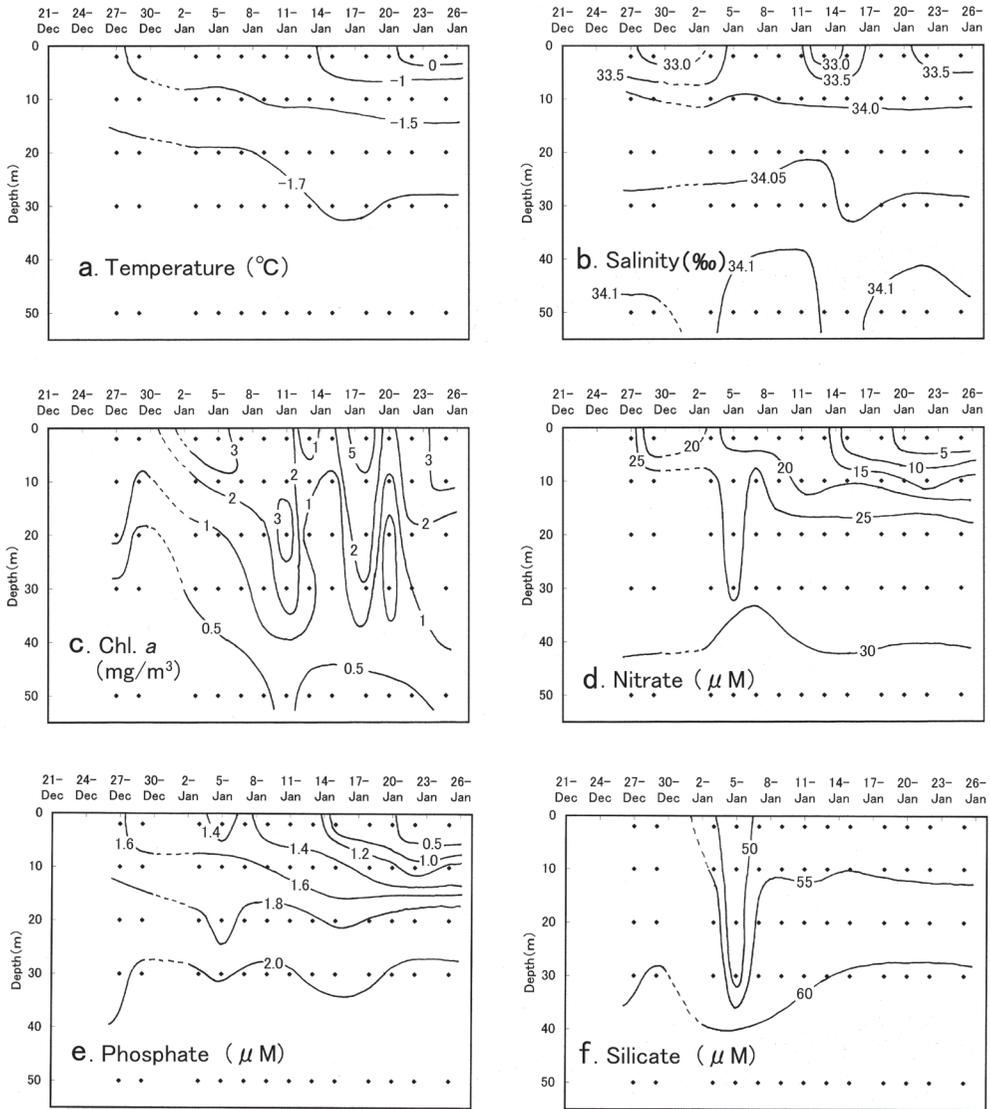


図 3 St. 46A および 46B における 2004 年 12 月 27 日から 2005 年 1 月 25 日にかけての水温 (a), 塩分 (b), クロロフィル *a* 濃度 (c), 硝酸塩濃度 (d), リン酸塩濃度 (e) およびケイ酸塩濃度 (f) の経時変化。

Fig. 3. Temporal variations of (a) temperature, (b) salinity, (c) chlorophyll *a*, (d) nitrate, (e) phosphate, and (f) silicate in the water column at St. 46A and 46B from 27 December 2004 to 25 January 2005.

なお、各採水層における全クロロフィル *a* 濃度に対する大きさ 10  $\mu\text{m}$  以上の大型植物プランクトンのクロロフィル *a* 濃度が占める割合は、観測期間の全体を通じて、水深 2 m や 10 m でほとんどが 40% 以下と小さかった (図 5)。

表 1 これまでオングル海峡で実施された観測で得られたクロロフィル *a* 濃度の最大値の比較  
 Table 1. Previous data of maximum chlorophyll *a* concentration observed under fast ice in Ongul Strait, Antarctica.

JARE No.	Date	Depth (m)	Ice thickness (m)	Max. Chl. <i>a</i> conc. (mg/m <sup>3</sup> )	Position	Reference
8	Jan. 29 '68	6	1.5-2.0	11.93	Kita-no-seto	星合 (1969)
23	Jan. 27 '83	5	0.9-1.4	11.30	Ongul Strait	Fukuchi et al. (1984)
24	Feb. '83	2.5	<2.0	4.99	Ongul Strait	Satoh et al. (1986)
24	Dec. 16 '83	0	1.2	342	Kita-no-seto	Satoh and Watanabe (1991)
33	Jan. 17 '92	5, 10	2.0	15.9	Ongul Strait	Odate and Fukuchi (1996)
38	Jan. 21 '97	20	2.3	10.9	Ongul Strait	Odate and Fukuchi (2004)
39	Jan. 22 '98	2	2.1-2.6	9.9	Kita-no-ura Cove	Ishikawa et al. (2001)
46	Jan. 18 '05	2	1.5	7.6	Ongul Strait	This study

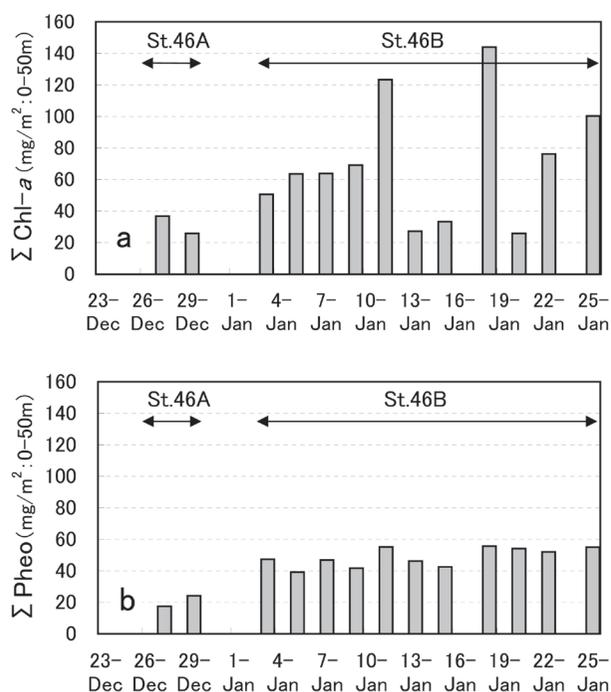


図 4 St. 46A および 46B における 2004 年 12 月 27 日から 2005 年 1 月 25 日にかけての水深 0-50 m の単位面積当たりクロロフィル *a* およびフェオ色素の積算量の時系列変化。

Fig. 4. Temporal variations of integrated (a) chlorophyll *a* and (b) pheo-pigments (0 to 50 m in depth) at St. 46A and 46B from 27 December 2004 to 25 January 2005.

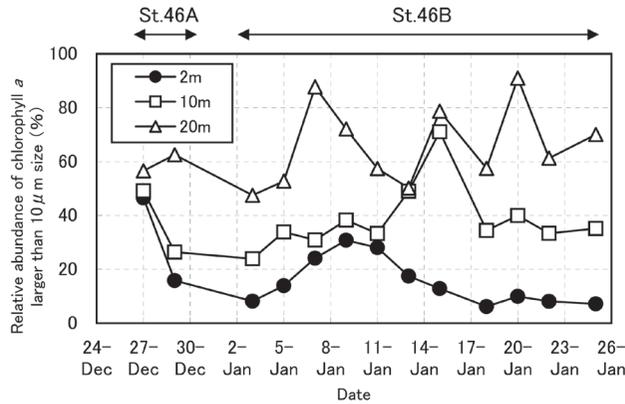


図 5 St. 46A および 46B における 2004 年 12 月 27 日から 2005 年 1 月 25 日までの全クロロフィル a 濃度に対するサイズ分画 10 μm 以上のクロロフィル a が占める割合の経時変化。

Fig. 5. Relative abundance of chlorophyll a fraction larger than 10 μm against total chlorophyll a at St. 46A and 46B from 27 December 2004 to 25 January 2005.

### 3.3. 流向・流速

流向・流速は，St. 46A で北向きの流れが卓越し（図 6b），流速は最大 12.4 cm/s，平均 4.4 cm/s であった（図 6a）．一方，St. 46B においては，北東向き及び北西向きの流れが卓越し（図 6d），流速は最大 13.1 cm/s，平均 2.5 cm/s であった（図 6c）．したがってオングル海峡全体としては，リュツォ・ホルム湾奥から東部湾口へ向かう北向きの流れが卓越していた．これは 1991 年に行われた Ohshima *et al.* (1993) のオングル海峡中央部における 12 月の係留観測の結果とほぼ同様であり，2004-05 年の夏期も，流速は小さいながらも，オングル海峡表層では北向きの流れが卓越していた．

## 4. 議論と考察

### 4.1. 外洋域の栄養塩濃度との比較

オングル海峡における最初と最後の観測結果を鉛直プロファイルにすると（図 7），観測期間中の硝酸塩の減少（図 7d）は，ほぼ 20 m 以浅で起きており，特に 10 m 以浅での減少が著しい．この硝酸塩濃度分布の変化から，定着氷存在下の一次生産は，定着氷直下の光が届くごく浅い層で集中的に起きていることが察せられる．

ここで，栄養塩の消費パターンから見た定着氷域における一次生産の特徴を明らかにするため，第 46 次隊の外洋域表層で観測された（2005 年 2-3 月，64° S，50-150° E）リン酸塩濃度と硝酸塩濃度の関係，及び硝酸塩濃度とケイ酸塩濃度の関係を比較した．リン酸塩と硝酸塩との関係（図 8a）は，両海域とも一般的なレッドフィールド比（ $\Delta N/\Delta P = 16$ ）に近い値であった．したがって，下層から表層に向かって，あるいは表層における時間の経過に伴う

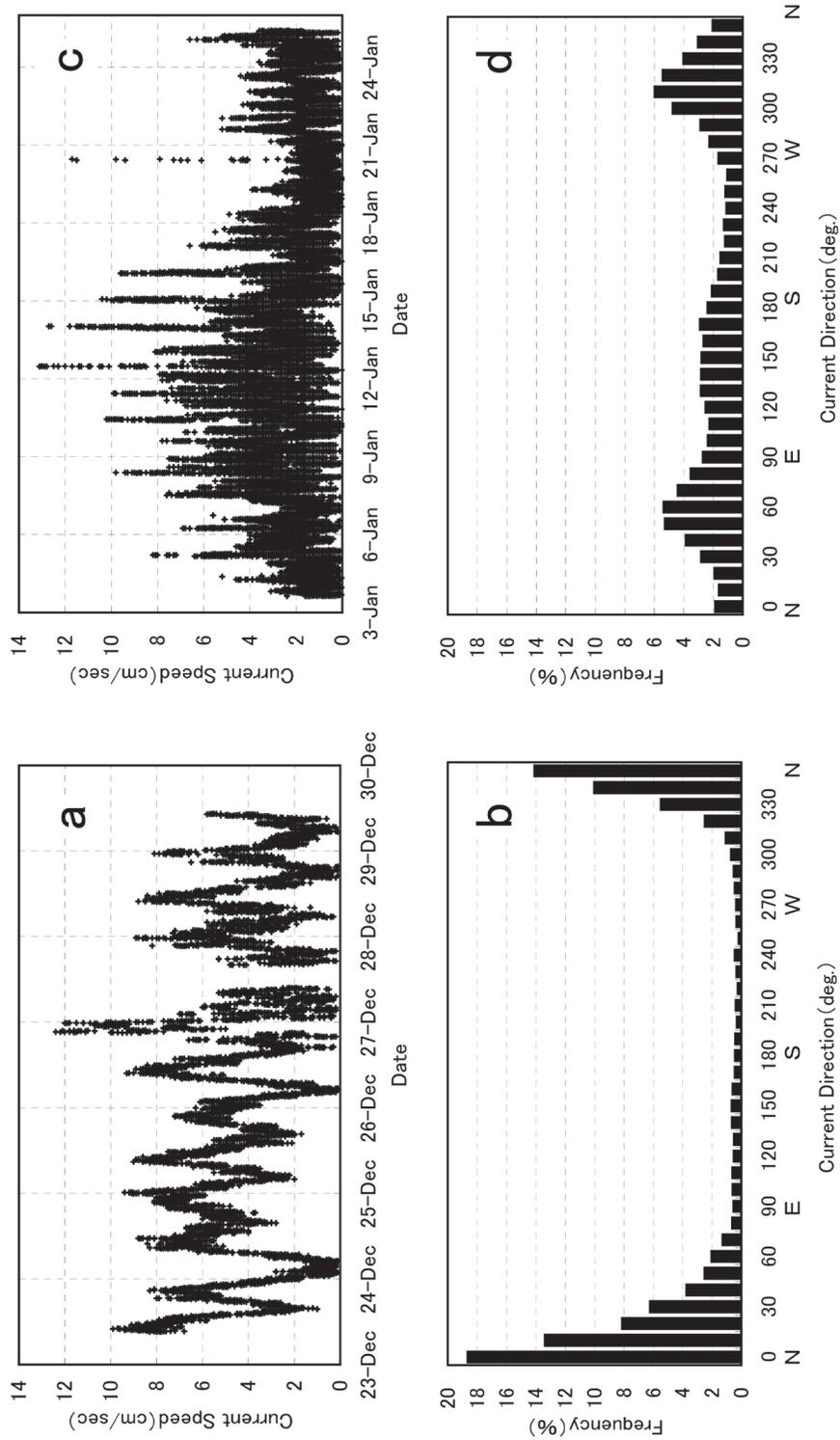


図 6 St. 46A および 46B における流速の時系列変化 (a, c) と流向の頻度 (b, d).  
Fig. 6. Time series variation of current speed (a, c) and frequency of current direction (b, d) at St. 46A and 46B respectively.

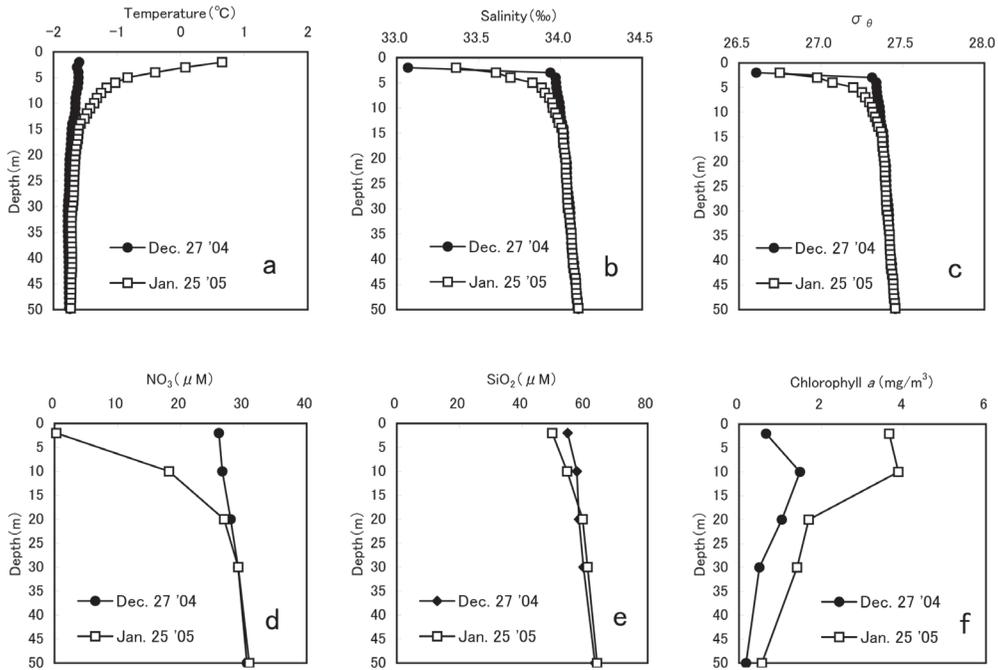


図 7 2004 年 12 月 27 日 (St. 46A) と 2005 年 1 月 25 日 (St. 46B) の水温 (a), 塩分 (b), 密度 (c), 硝酸塩 (d), ケイ酸塩 (e), クロロフィル *a* (f) の鉛直プロファイルの比較.

Fig. 7. Comparisons of vertical profiles of water properties between 27 December 2004 (St. 46A) and 25 January 2005 (St. 46B).

硝酸塩・リン酸塩の減少は、両海域とも植物プランクトンの一次生産によるものと推定される。しかし、外洋域は何らかの要因で一次生産が制限され、硝酸塩・リン酸塩が使い残されているのに対し、オンゲル海峡ではごく表層に限られるものの、硝酸塩・リン酸塩は枯渇するまで消費されるような大きな生産性を持つものと考えられる。

一方、硝酸塩濃度とケイ酸塩濃度との関係は両者で大きく異なり (図 8b)、外洋域では硝酸塩より先にケイ酸塩が消費される傾向が見られるのに対し、オンゲル海峡では硝酸塩の消費が著しい一方で、ケイ酸塩が使い残される傾向が見られた。これは 2004-05 年夏季のオンゲル海峡定着氷下における一次生産は、植物プランクトン群集に占める珪藻の割合が小さかったことを示している。

#### 4.2. クロロフィル *a* と硝酸塩濃度との関係について

Odate and Fukuchi (2004) は、同じオンゲル海峡の複数の観測点における観測 (1996-97 年) で、クロロフィル *a* 濃度と硝酸塩濃度が一次の良い逆相関の関係にあったと述べている。しかし、2004-05 年のシーズンでは、両者の相関は悪く (図 9)、さらに、直線回帰したクロ

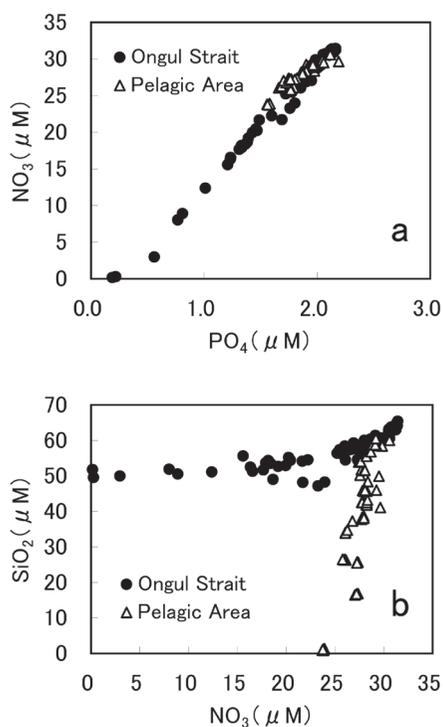


図 8 オングル海峡および南大洋外洋域におけるリン酸塩濃度と硝酸塩濃度 (a) および硝酸塩濃度とケイ酸塩濃度 (b) の関係。

Fig. 8.  $PO_4$ - $NO_3$  (a) and  $NO_3$ - $SiO_2$  (b) relationships in Ongul Strait and the pelagic Southern Ocean.

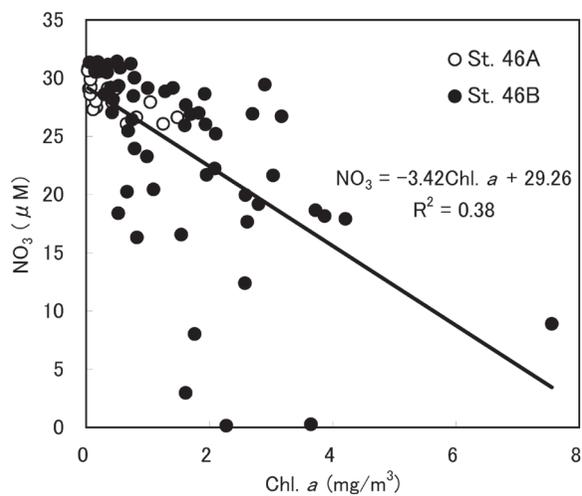


図 9 St. 46A および 46B における 2004 年 12 月 27 日から 2005 年 1 月 25 日にかけてのクロロフィル *a* 濃度と硝酸塩濃度との関係。

Fig. 9. Relationship between Chlorophyll *a* and  $NO_3$  in the water column at St. 46A and 46B from 27 December 2004 to 25 January 2005.

ロフィル  $a$  濃度の増加に対する硝酸塩濃度の減少 ( $-3.41 \mu\text{mol}/\mu\text{g}$ ) は、1996-97 年のシーズン ( $-0.89 \mu\text{mol}/\mu\text{g}$ ) の 3 倍以上であった。

したがって、2004-05 年シーズンはクロロフィル  $a$  の見かけの濃度 (現存量) は少ないものの、栄養塩の減少量から察すると、観測期間中の純生産量は 1996-97 年シーズンに比べて大きかったことになる。観測されたクロロフィル  $a$  の濃度が小さいのは、増殖した植物プランクトンが動物プランクトンに活発に捕食されたか、植物プランクトン自身が下層へ沈降したためであろう。いったん減少した植物プランクトンは、まだ表層水中に残留している栄養塩を利用したり、定着氷下部のアイスアルジーの落下や、氷厚の減少及び定着氷の構造の変化に伴って増加する光を使って、増殖を繰り返したと考えられる。流向・流速の観測から、定着氷下の海水にも流れが存在するので、このような植物プランクトンの増減は、海水が定着氷下を流れてオングル海峡に達するまでに起こり、その結果の積算が硝酸塩の減少量として記録されたと考えられる。

#### 4.3. 植物プランクトン優占種の推定

各採水層における全クロロフィル  $a$  濃度に対する大きさ  $10 \mu\text{m}$  以上の大型植物プランクトンのクロロフィル  $a$  濃度の割合の時系列変化 (図 5) は、クロロフィル  $a$  濃度が大きく、光合成が活発であるはずの水深  $2 \text{ m}$  や  $10 \text{ m}$  で  $40\%$  以下と小さい。この結果は 1997-98 年の定着氷直下において、 $10 \mu\text{m}$  以上の大型植物プランクトンが占める割合が  $70\%$  以上 (Ishikawa *et al.*, 2001) であったのと対照的である。

$10 \mu\text{m}$  以上の大型植物プランクトンの多くは珪藻類であろうと推測される。このように植物プランクトンのサイズから判断しても、そして硝酸塩やリン酸塩に対するケイ酸塩の減少量が少なかった (図 8b) ことからみても、2004-05 年のシーズンは、オングル海峡における珪藻類の一次生産が何らかの原因で少なかった可能性がある。

Ishikawa *et al.* (2001) の 1997-98 年の観測結果と、2004-05 年の観測結果を比較した場合、海洋環境の最大の相違点は表層の成層化の度合いである。1997-98 年シーズンは、観測期間中の塩分の低下が  $30 \text{ m}$  以深にまで及んだのに対し、2004-05 年は  $5 \text{ m}$  程度の水深までしか塩分が低下しなかった (図 7b)。したがって、珪藻類の増殖を抑制する要因の一つとして、成層化が弱かったことが挙げられる。表層における鉛直方向の密度差が小さいと、植物プランクトンは下層へ沈降しやすく、光を十分に利用できる表層に長く留まることができない。南大洋外洋域では、風などの働きで表層に厚さ数  $10 \text{ m}$  の混合層が形成され、その下層に密度躍層があって、植物プランクトンは密度躍層より下層へ沈降せずに、混合層の中で安定して光合成を継続して行うことができる。しかし定着氷が存在すると、風による攪乱が海中に及ばず厚い表層混合層が形成されないほか、光環境も悪いいため、植物プランクトンはいった

ん表層を離れてしまえば、光合成を継続することは困難である。そのためサイズが大きく下方へ沈降しやすい珪藻類の増殖が妨げられ、小さくて下層に沈みにくい小型あるいは微小サイズの植物プランクトンが卓越したのではないかと考えられる。

#### 4.4. 定着氷下のクロロフィル $a$ の起源

2004-05年シーズンの観測点における定着氷の厚さは、最大でも1.5 mであり、1996-97年が積雪も含め、定着氷の厚さが2.1-3.6 m (Odate and Fukuchi, 2004), 1997-98年でも2.1-2.5 m (Ishikawa *et al.*, 2001) あったのに対し、薄かった。Watanabe and Satoh (1987) 及び Odate *et al.* (2004) によれば、海氷の厚さが1 m 増すごとに水中の光量は10分の1ずつ減少する

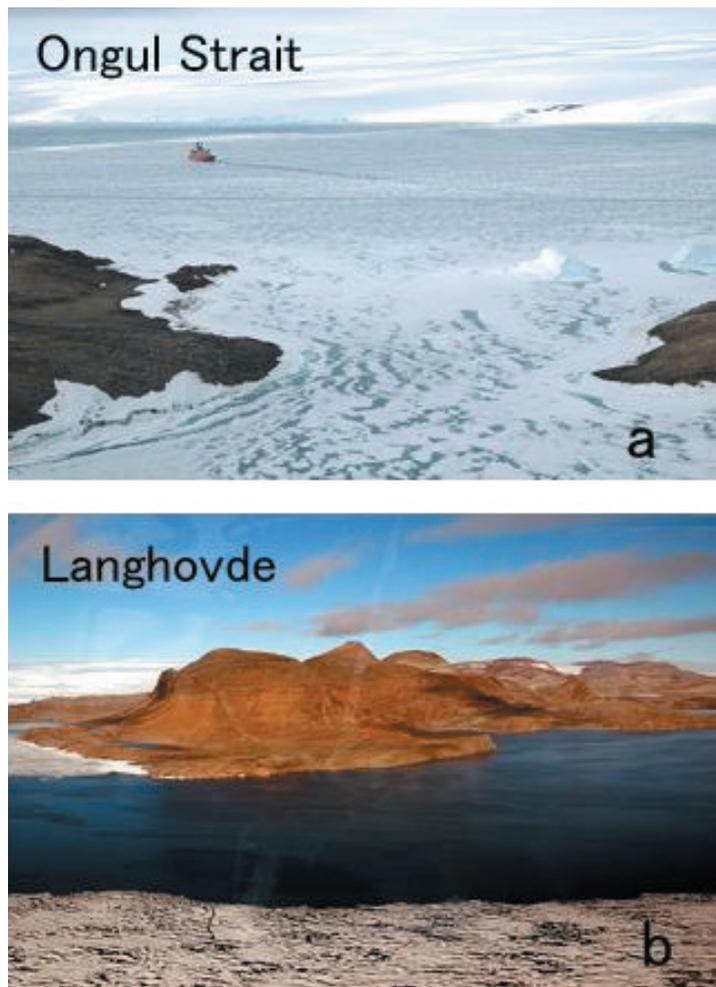


図 10 2005年1月29日におけるオングル海峡付近およびラングホブデ沖における定着氷の状態。  
Fig. 10. Conditions of fast ice near Ongul Strait and off the Langhovde area on 29 January 2005.

という。したがって、定着氷を透過して海中へ届く光の量は、氷厚 1.0–1.5 m の今シーズンのオングル海峡では、Watanabe and Satoh (1987) の積雪と氷厚による光の減衰の式から、海水面の約 0.6–2.3 % であったと見積もられる。その値は氷厚 2.0 m 以上の 1996–97 年の 10 倍以上に達していたと考えられるが、それでも多量の植物プランクトンが増殖するには十分とは言えない光量だったと思われる。

Odate and Fukuchi (2004) は、定着氷の下で観測される高濃度の植物プランクトンは、光条件の良い海水の存在しない海域で増殖したものが、海水の移流に伴って運ばれてきたものであると推測している。オングル海峡定着氷下の流れは、大まかに南から北への向きへ、平均 5 cm/s 弱の流速であったから、その流向と流速を保持して表層水が流れ続けているとすると、オングル海峡から 30–50 km 南のラングホブデヤスカルブスネス沖付近にあった海水が、7–12 日間程度でオングル海峡へと流れている可能性がある。

日本南極地域観測隊における経験的な観測・観察によれば、ラングホブデヤスカルブスネスといった宗谷海岸露岩地帯付近の定着氷は、オングル海峡周辺にくらべて早い時期に融解が進み、開水面も形成されることが多い。2005 年も同様であり、同じ 1 月 29 日に、オングル海峡は定着氷に覆われていたが、ラングホブデ沖は開水面が広がっていた (図 10)。そのような光環境のよいリュツォ・ホルム湾宗谷海岸の開水面や薄氷域で植物プランクトンは増殖し、海流によって北東部海域へ輸送されているのであろう。

オングル海峡や北の浦の厚い定着氷下で、植物プランクトンが増加する現象は長年の疑問であったが、海流や周辺の定着氷の状態を考慮すると、以上のように比較的近い宗谷海岸の開水面及び薄氷域で増殖したものが移流すると考えるのが妥当であろう。

## 5. ま と め

2004–05 年シーズンの夏季オングル海峡定着氷域における一次生産の特徴をまとめると以下のようなになる。

時間の経過に伴う硝酸塩とリン酸塩の減少が水深 20 m 以浅で大きく、しかも硝酸塩濃度とリン酸塩濃度の減少の割合がレッドフィールド比に沿うことから、定着氷下では集中的な一次生産が行われたと推察される。ただしケイ酸塩はほとんど減少しなかった。これは鉛直方向の密度差が小さく、サイズの大きく沈降しやすい珪藻類の増殖が難しく、珪藻類ではない小型あるいは微小な植物プランクトンが増殖したことを示唆している。

観測期間中の最大クロロフィル *a* 濃度は  $7.6 \text{ mg/m}^3$  と、これまでの観測結果に比較してそれほど大きな値ではなかった。一方、クロロフィル *a* 濃度に対する硝酸塩濃度の減少の割合が大きかった (1996–97 年シーズンの 3 倍以上) ことは、例年よりも大きな一次生産が起きたことを示している。以前の観測時よりも定着氷の氷厚が 1.5 m 以下と 1 m 以上薄く、海中に

10 倍以上の光が透過したと考えられることも、生産が大きかった理由の一つであろう。

ただし氷厚が 1.5 m あると定着氷下に届く光量は海水面の 1 % 程度であるので、観測点やその近傍のみで植物プランクトンの増殖が行われたとは考えにくい。しかし、オングル海峡の 30-50 km 南方のラングホブデヤスカルブスネスの定着氷は、これまでの観測からオングル海峡に比べて早い時期に融解が進み、薄氷域や開放水面が形成されやすいことがわかっている。しかもオングル海峡には弱いながら北向きの流れが存在する。

従って以上の結果から、オングル海峡で観測された植物プランクトン量の増加と硝酸塩、リン酸塩の減少は、定着氷がないもしくは薄くて海中の光環境がよい南方で起こり、それが移流して観測されたものと考えられることができる。

このように、定点における CTD・鉛直採水観測と流向・流速観測、さらには上空からの定着氷の観察を合わせて行うことで、定着氷下の一次生産を考える上で、環境の異なる周辺海域からの海水の移流についても考慮すべきことが明らかとなった。今回の解釈の正当性を確認するためには、何らかの方法でリュツォ・ホルム湾宗谷海岸沖海域の海洋観測を行って、大きな一次生産が実際に起きているかどうかを確認する必要があるほか、定着氷が融けて薄氷部や開水面ができるメカニズムと、その経年変動についても調査を行う必要があるだろう。

今回の観測結果をもとに、定着氷下における植物プランクトンの生育を左右する因子をより明確にできるよう、手法に改良を加えた上で本観測を継続する考えである。

## 謝 辞

定着氷上における観測作業をはじめ、機材の運搬や通信連絡を通じ、日本南極地域観測隊の第 45 次山岸久雄越冬隊長及び第 46 次松原廣司隊長ならびに渡邊研太郎越冬隊長をはじめ、隊員の皆様方にお世話になりました。特に氷上における観測作業をお手伝いいただいた第 46 次隊の Voranop Vijakarn 博士、岡林功さん、溝渕裕史さん、栄養塩濃度測定を行っていた鈴木和則さんに変えてお世話になりました。心より感謝申し上げます。

なお、本研究は情報・システム研究機構国立極地研究所のプロジェクト研究「季節海水域における表層生態系と中・深層生態系の栄養循環に関する研究」の一部として行われました。

## 文 献

- Anderson, L. (1979): Simultaneous spectrophotometric determination of nitrite and nitrate by flow injection analysis. *Anal. Chim. Acta*, **110**, 123-128.
- Bergamin, H., Reis, B. F. and Zagatto, E. A. G. (1978): A new device for improving sensitivity and stabilization in flow-injection analysis. *Anal. Chim. Acta*, **97**, 427-431.
- Fukuchi, M., Tanimura, A. and Otsuka, H. (1984): Seasonal change of chlorophyll *a* under fast ice in Lützow-Holm Bay, Antarctica. *Mem. Natl. Inst. Polar Res., Spec. Issue*, **32**, 51-59.
- Gine, M. F., Bergamin, H., Zagatto, E. A. G. and Reis, B. F. (1980): Simultaneous determination of nitrate and nitrite by flow injection analysis. *Anal. Chim. Acta*, **114**, 191-197.
- 星合孝男 (1969): 昭和基地における海水下のクロロフィル *a* 量と環境条件の季節変化. *南極資料*, **35**,

52-67.

- Ishikawa, A., Washiyama, N., Tanimura, A. and Fukuchi, M. (2001): Variation in the diatom community under fast ice near Syowa Station, Antarctica, during the austral summer of 1997/98. *Polar Biosci.*, **14**, 10-23.
- 本水昌二・是近勝彦 (1988): モリブドケイ酸の吸光度測定に基づく微量ケイ素のフローインジェクション分析法. *分析化学*, **37**, T115-T119.
- Odate, T. and Fukuchi, M. (1996): Differences in development of summer phytoplankton bloom under fast ice around Syowa Station, Antarctica. *Proc. NIPR Symp. Polar Biol.*, **9**, 125-130.
- Odate, T. and Fukuchi, M. (2004): Temporal changes in chlorophyll *a* and nitrate concentrations under fast ice near Syowa Station, Antarctica, in austral summer. *Nankyoku Shiryô (Antarct. Rec.)*, **48**, 157-164.
- Odate, T., Hirawake, T. and Fukuchi, M. (2004): Empirical relationship between sea ice thickness and underwater light intensity based on observations near Syowa Station, Antarctica, in austral summer. *Nankyoku Shiryô (Antarct. Rec.)*, **48**, 91-97.
- Ogata, J. and Suzuki, K. (2006): Oceanographic data of the 46th Japanese Antarctic Research Expedition from December 2004 to March 2005. *JARE Data Rep.*, **295** (*Oceanography* 30), 56 p.
- Ohshima, K. I., Kawamura, T., Takizawa, T., Ushio, S., Ono, N. and Kawaguchi, S. (1993): Seasonal variation in ocean structure and current in Ongul Strait, Antarctica, in 1991. *Proc. NIPR Symp. Polar Meteorol. Glaciol.*, **7**, 51-59.
- Satoh, H., Watanabe, K., Kanda, H. and Takahashi, E. (1986): Seasonal changes of chlorophyll *a* standing stocks and oceanographic conditions under fast ice near Syowa Station, Antarctica, in 1983/84. *Nankyoku Shiryô (Antarct. Rec.)*, **30**, 19-32.
- Satoh, H. and Watanabe, K. (1991): A red water-bloom caused by the autotrophic ciliate, *Mesodinium rubrum*, in the austral summer in the fast ice area near Syowa Station, Antarctica, with note on their photosynthetic rate. *J. Tokyo Univ. Fish.*, **78**, 11-17.
- Strickland, J. D. H. and Parsons, T. R. (1972): Practical handbook of seawater analysis. *Bull. Fish. Res. Board Can.*, 2nd ed., **167**, 311 p.
- Suzuki, R. and Ishimaru, T. (1990): An improved method for the determination of phytoplankton chlorophyll using *N, N*-dimethylformamide. *J. Oceanogr. Soc. Jpn.*, **46**, 190-194.
- Watanebe, K. and Satoh, H. (1987): Seasonal variation of ice algal standing crop near Syowa Station, East Antarctica, in 1983/84. *Bull. Plankton Soc. Jpn.*, **34**, 143-164.

付録 1 観測点 46A 及び 46B における海洋観測データ  
Appendix 1. Oceanographic data of Station 46A and 46B.

Station	Date	Depth (m)	Temp. (°C)	Salinity (‰)	Sigmat	SiO <sub>2</sub> (µM)	PO <sub>4</sub> (µM)	NO <sub>3</sub> (µM)	NO <sub>2</sub> (µM)	Chl. <i>a</i> (mg/m <sup>3</sup> )	Chl. <i>a</i> (>10µm) (mg/m <sup>3</sup> )	Phaeo. (mg/m <sup>3</sup> )
46A	Dec. 27 '04	2	-1.597	33.068	26.606	54.47	1.766	26.08	0.067	0.657	0.305	0.396
		10	-1.655	33.998	27.362	57.42	1.782	26.62	0.065	1.482	0.728	0.587
		20	-1.741	34.085	27.395	58.11	1.919	27.94	0.067	1.040	0.588	0.460
		30	-1.772	34.059	27.415	59.53	1.976	29.12	0.063	0.495	0.303	0.263
		50	-1.754	34.105	27.452	63.19	2.071	30.52	0.061	0.171	0.068	0.131
46A	Dec. 29 '04	2	-1.056	32.817	26.386	55.62	1.209	15.58	0.119	1.249	0.197	1.066
		10	-1.648	33.995	27.360	57.38	1.748	25.48	0.077	0.817	0.216	0.730
		20	-1.708	34.025	27.386	58.79	1.906	28.09	0.066	0.422	0.264	0.486
		30	-1.753	34.056	27.412	60.70	2.034	29.78	0.077	0.352	0.169	0.322
		50	-1.750	34.113	27.459	63.74	2.080	30.75	0.065	0.151	0.029	0.151
46B	Jan. 03 '05	2	-1.366	33.484	26.936	54.15	1.489	21.65	0.080	3.034	0.248	2.794
		10	-1.574	33.982	27.347	55.63	1.774	25.93	0.067	1.601	0.383	1.793
		20	-1.695	34.081	27.390	57.78	1.933	28.47	0.054	0.769	0.365	0.572
		30	-1.742	34.051	27.408	58.61	2.028	29.34	0.070	0.527	0.272	0.433
		50	-1.766	34.081	27.433	60.57	2.053	30.60	0.067	0.244	0.090	0.231
46B	Jan. 05 '05	2	-1.371	33.835	27.222	49.04	1.383	18.65	0.079	3.722	0.519	1.964
		10	-1.591	34.011	27.371	48.17	1.690	21.70	0.067	1.954	0.661	1.205
		20	-1.708	34.048	27.404	47.16	1.759	23.27	0.052	0.988	0.521	0.554
		30	-1.723	34.054	27.410	48.26	1.803	23.96	0.067	0.787	0.406	0.586
		50	-1.750	34.133	27.475	64.16	2.135	31.39	0.058	0.192	0.105	0.225
46B	Jan. 07 '05	2	-1.432	33.911	27.285	52.94	1.429	19.96	0.077	2.587	0.624	2.000
		10	-1.587	34.018	27.376	56.38	1.722	25.22	0.060	2.103	0.650	2.039
		20	-1.716	34.053	27.409	56.56	1.895	27.69	0.077	1.619	1.420	0.768
		30	-1.752	34.080	27.432	59.86	2.036	30.03	0.081	0.785	0.504	0.495
		50	-1.744	34.146	27.485	61.79	2.105	30.60	0.077	0.143	0.107	0.142
46B	Jan. 09 '05	2	-1.187	33.591	27.018	51.29	1.235	16.56	0.107	1.545	0.476	0.824
		10	-1.474	33.805	27.201	54.54	1.598	22.23	0.076	2.085	0.797	1.051
		20	-1.674	33.951	27.325	57.72	1.898	27.01	0.075	1.828	1.318	1.163
		30	-1.721	33.980	27.350	59.22	2.011	28.86	0.110	1.281	0.860	0.812
		50	-1.751	34.069	27.423	63.50	2.131	31.16	0.064	0.357	0.115	0.354
46B	Jan. 11 '05	2	-1.197	33.736	27.135	51.66	1.311	17.66	0.093	2.613	0.733	1.684
		10	-1.473	33.979	27.342	52.70	1.391	19.17	0.094	2.796	0.931	1.834
		20	-1.682	34.049	27.405	57.82	1.863	26.73	0.069	3.171	1.820	1.312
		30	-1.742	34.081	27.432	60.01	2.027	29.45	0.084	2.900	1.623	0.849
		50	-1.747	34.116	27.461	62.97	2.122	31.24	0.075	0.726	0.372	0.276

Station	Date	Depth (m)	Temp. (°C)	Salinity (‰)	Sigmat	SiO <sub>2</sub> (µM)	PO <sub>4</sub> (µM)	NO <sub>3</sub> (µM)	NO <sub>2</sub> (µM)	Chl. <i>a</i> (mg/m <sup>3</sup> )	Chl. <i>a</i> (>10µm) (mg/m <sup>3</sup> )	Phaco. (mg/m <sup>3</sup> )
46B	Jan. 13 '05	2	-1.041	32.635	26.238	52.47	1.233	16.32	0.150	0.826	0.144	0.592
		10	-1.521	33.999	27.360	54.40	1.459	20.44	0.084	1.094	0.536	1.260
		20	-1.647	34.033	27.391	58.06	1.841	26.43	0.130	0.741	0.372	1.366
		30	-1.720	34.076	27.428	59.84	1.992	28.61	0.075	0.298	0.298	0.919
		50	-1.736	34.117	27.461	64.99	2.158	31.35	0.075	0.056	0.053	0.383
46B	Jan. 15 '05	2	-0.547	33.426	26.860	51.86	0.767	8.02	0.114	1.761	0.226	1.174
		10	-1.430	33.954	27.320	55.20	1.469	20.25	0.090	0.666	0.473	0.930
		20	-1.582	34.008	27.368	57.26	1.779	25.47	0.086	0.681	0.536	1.102
		30	-1.673	34.039	27.396	59.80	1.945	28.18	0.081	0.436	0.395	0.725
		50	-1.719	34.084	27.434	62.68	2.108	30.49	0.089	0.339	0.283	0.518
46B	Jan. 18 '05	2	-0.846	33.656	27.058	50.54	0.810	8.90	0.166	7.556	0.469	1.149
		10	-1.296	33.930	27.296	53.67	1.335	17.91	0.109	4.206	1.448	1.738
		20	-1.645	34.032	27.390	59.27	1.906	26.93	0.085	2.699	1.552	1.444
		30	-1.698	34.052	27.407	60.38	1.986	28.64	0.101	1.924	1.132	0.945
		50	-1.737	34.119	27.463	64.70	2.138	31.30	0.086	0.499	0.236	0.451
46B	Jan. 20 '05	2	-0.703	33.818	27.184	49.95	0.560	2.97	0.149	1.616	0.160	1.361
		10	-1.412	33.968	27.331	53.54	1.368	18.39	0.096	0.521	0.208	1.276
		20	-1.658	34.027	27.386	58.85	1.950	27.05	0.061	0.421	0.383	1.583
		30	-1.703	34.053	27.409	60.20	2.034	29.19	0.091	0.402	0.238	0.876
		50	-1.739	34.113	27.458	63.95	2.163	31.21	0.078	0.123	0.083	0.556
46B	Jan. 22 '05	2	0.595	33.253	26.664	51.79	0.188	0.16	0.044	2.274	0.184	0.529
		10	-1.418	33.963	27.327	51.11	1.011	12.38	0.122	2.576	0.860	1.534
		20	-1.638	34.026	27.385	58.41	1.854	26.02	0.089	1.939	1.187	1.566
		30	-1.708	34.063	27.417	61.39	2.034	29.14	0.108	0.998	0.871	1.010
		50	-1.737	34.117	27.461	65.40	2.164	31.43	0.095	0.503	0.192	0.420
46B	Jan. 25 '05	2	0.651	33.362	26.750	49.57	0.218	0.27	0.053	3.648	0.262	1.079
		10	-1.360	33.954	27.318	54.33	1.330	18.16	0.095	3.871	1.359	1.605
		20	-1.654	34.030	27.389	59.27	1.905	26.90	0.113	1.694	1.187	1.372
		30	-1.696	34.046	27.402	60.84	2.016	29.15	0.116	1.411	0.960	1.065
		50	-1.730	34.110	27.456	63.88	2.146	30.90	0.104	0.555	0.202	0.442

付録 2 観測点 46A の水深 10 m における流向および流速  
*Appendix 2. Current speed and direction at 10 m depth of Station 46A.*

Date	Time (GMT)	Current speed at 10 m (cm/s)	Current direction (degree)
2004			
Dec. 23	15:00	7.5	6.8
	18:00	2.4	39.1
	21:00	4.6	5.6
Dec. 24	0:00	7.2	355.9
	3:00	2.6	5.5
	6:00	0.8	83.9
	9:00	2.6	6.2
	12:00	6.5	20.3
	15:00	5.8	16.3
	18:00	5.7	18.9
	21:00	5.1	31.3
Dec. 25	0:00	7.4	14.7
	3:00	8.6	13.9
	6:00	5.3	3.8
	9:00	4.6	27.6
	12:00	8.2	5.4
	15:00	5.4	13.0
	18:00	4.4	37.0
	21:00	3.9	359.7
Dec. 26	0:00	5.2	345.1
	3:00	5.2	2.7
	6:00	3.0	32.4
	9:00	1.7	26.8
	12:00	7.3	1.1
	15:00	6.4	355.1
	18:00	3.3	63.8
	21:00	3.6	332.2
Dec. 27	0:00	9.4	8.5
	3:00	8.5	334.5
	6:00	2.0	170.7
	9:00	1.1	347.2
	12:00	2.8	337.6
	15:00	n.d.	n.d.
	18:00	n.d.	n.d.
	21:00	2.7	156.6
Dec. 28	0:00	4.2	10.9
	3:00	5.8	10.2
	6:00	4.8	21.8
	9:00	1.5	101.7
	12:00	4.4	11.0
	15:00	7.4	345.8
	18:00	1.9	39.6
	21:00	0.9	177.1
Dec. 29	0:00	5.1	340.2
	3:00	5.1	7.0
	6:00	1.9	62.4
	9:00	1.8	212.9
	12:00	1.2	17.5

付録 3 観測点 46B の水深 10 m における流向および流速  
Appendix 3. Current speed and direction at 10 m depth of Station 46B.

Date	Time	Current speed	Current	Date	Time	Current speed	Current
	(GMT)	at 10 m	direction		(GMT)	at 10 m	direction
		(cm/s)	(degree)			(cm/s)	(degree)
2005				2005			
Jan. 03	21:00	0.84	97.12	Jan. 10	0:00	2.08	331.26
Jan. 04	0:00	1.5	139.92		3:00	0.96	265.8
	3:00	0.58	61.78		6:00	0.99	52.31
	6:00	1.06	71.03		9:00	0.58	150.67
	9:00	3.18	304.12		12:00	3.27	333.88
	12:00	0.97	218.97		15:00	0.58	266.54
	15:00	0.96	112.39		18:00	4.22	47.96
	18:00	1.24	219.75		21:00	2.59	157.12
Jan. 05	21:00	1.44	176.66	Jan. 11	0:00	2.4	345.73
	0:00	1.82	50.27		3:00	2.09	253.8
	3:00	0.76	115.98		6:00	5	75.31
	6:00	1.64	170.99		9:00	1.28	189.93
	9:00	5.11	306.37		12:00	4.26	333.05
	12:00	1.21	144.13		15:00	3.31	174.26
	15:00	3.59	44.86		18:00	6.21	59.03
	18:00	1.89	48.29		21:00	3.1	156.36
Jan. 06	21:00	0.97	86.32	Jan. 12	0:00	3.16	344.23
	0:00	1.71	186.08		3:00	4.67	291.24
	3:00	2.56	110.95		6:00	5.98	84.86
	6:00	1.6	34.1		9:00	1.69	155.11
	9:00	5.71	305.77		12:00	2.3	22.25
	12:00	2.28	193.37		15:00	5.42	324.89
	15:00	1.13	111.09		18:00	5.27	71.25
	18:00	2.53	96.74		21:00	2.43	164.05
Jan. 07	21:00	2.09	75.95	Jan. 13	0:00	2.4	234.81
	0:00	0.77	109.78		3:00	6.01	104.11
	3:00	1.62	154.37		6:00	1.91	164.89
	6:00	0.71	41.31		9:00	3.5	74.75
	9:00	2.26	22.93		12:00	0.59	233.72
	12:00	1.73	222.87		15:00	3.17	337.51
	15:00	5.19	58.39		18:00	2.64	107.96
	18:00	4.65	69.06		21:00	2.82	96.8
Jan. 08	21:00	0.72	166.67	Jan. 14	0:00	2.08	4.32
	0:00	2.67	216.72		3:00	9.67	327.35
	3:00	2.82	47.28		6:00	3.56	212.67
	6:00	1.36	101.64		9:00	5.06	64.24
	9:00	1.67	31.9		12:00	2.25	53.01
	12:00	7.49	297.55		15:00	2.69	332.32
	15:00	4.61	49.9		18:00	2.53	52.81
	18:00	3.71	92.53		21:00	3.48	124.45
Jan. 09	21:00	1.2	48.34	Jan. 15	0:00	1.57	74.46
	0:00	6.52	307.51		3:00	8.27	103.57
	3:00	2.84	106.55		6:00	1.3	180.86
	6:00	4.33	59.56		9:00	3.62	61.05
	9:00	1.74	35.23		12:00	1.25	293.18
	12:00	2.91	8.48		15:00	2.57	34.59
	15:00	3.43	92.43		18:00	0.69	41.01
	18:00	n.d.	n.d.		21:00	3.02	82.76
	21:00	1.6	191.46				

## 付録 3 続き

Appendix 3 (continued).

Date	Time	Current speed at 10 m (cm/s)	Current direction (degree)	Date	Time	Current speed at 10 m (cm/s)	Current direction (degree)
	(GMT)				(GMT)		
2005				2005			
Jan. 16	0:00	0.77	137.69	Jan. 22	0:00	1.07	244.11
	3:00	2.81	3.4		3:00	1.07	14.82
	6:00	5.77	305.09		6:00	2.07	120.57
	9:00	3.16	103.38		9:00	1.17	71.48
	12:00	2.48	31.67		12:00	1.67	208.5
	15:00	0.59	198.69		15:00	1.15	193.76
	18:00	1.16	173.28		18:00	1.88	139.93
Jan. 17	21:00	2.35	71.62	Jan. 23	21:00	0.41	137.92
	0:00	1.27	96.56		0:00	0.99	359.89
	3:00	1.56	9.05		3:00	2.28	175.53
	6:00	4.74	171.26		6:00	1.99	218.66
	9:00	3.03	255.95		9:00	1.05	229.42
	12:00	1.45	105.42		12:00	0.83	80.71
	15:00	1.12	73.46		15:00	1.09	62.41
Jan. 18	18:00	2.12	137.13	Jan. 24	18:00	2.9	153.08
	21:00	3.94	68.58		21:00	2.16	177.29
	0:00	2.16	42.98		0:00	1.31	255.24
	3:00	0.72	15.97		3:00	0.87	289.26
	6:00	1.36	345.85		6:00	2.37	168.95
	9:00	1.72	127.04		9:00	0.8	97.86
	12:00	3.1	51.27		12:00	1.38	358.22
Jan. 19	15:00	1.98	138.6	Jan. 25	15:00	2.35	75.32
	18:00	0.65	118.42		18:00	1.57	145.8
	21:00	1.03	287.44		21:00	1.58	187.12
	0:00	0.96	44.68		0:00	2.05	342.32
	3:00	0.68	84.86		3:00	1.62	43.16
	6:00	0.98	235.85		6:00	4.14	176.16
	9:00	1.23	230.84		9:00	2.96	166.67
Jan. 20	12:00	0.75	85.05	Jan. 21	12:00	2.14	0.91
	15:00	0.63	224		0:00	0.98	156.89
	18:00	1.19	183.93		3:00	0.58	182.6
	21:00	0.48	96.51		6:00	1.93	172.85
	0:00	0.73	202.06		9:00	1.5	209.04
	3:00	1.68	178.86		12:00	0.65	22.08
	6:00	1.11	189.28		15:00	1.91	119.46
Jan. 21	9:00	0.8	10.44	18:00	3.75	116.3	
	12:00	1.4	347.44	21:00	2.2	130.35	
	15:00	1.34	101.28				
	18:00	1.01	171.94				
	21:00	0.83	78.17				
	0:00	0.98	156.89				
	3:00	0.58	182.6				
6:00	1.93	172.85					
9:00	1.5	209.04					
12:00	0.65	22.08					
15:00	1.91	119.46					
18:00	3.75	116.3					
21:00	2.2	130.35					