

1994年初春及び初夏の南極昭和基地周辺の定着氷下で
採集された沈降粒子の組成齋藤良子¹・工藤 栄²・佐藤壽彦³・渡辺研太郎²・福地光男²Composition of Sinking Particulates Collected under Fast
Ice near Syowa Station, East Antarctica, in
Early Spring and Early Summer, 1994Ryoko SAITO¹, Sakae KUDOH², Toshihiko SATO³, Kentaro WATANABE²
and Mitsuo FUKUCHI²

Abstract: Sinking particles collected in several sediment trap experiments near Syowa Station in austral spring–summer in 1994 have been microscopically analyzed. From the features of the shape and morphology, collected particles were identified, enumerated and measured, and the flux of each identified species was estimated. The majority of the particles were composed of diatom cells and “fecal pellet”-like aggregates of zooplankton. Eleven centric diatom species, 9 pennate diatoms and 4 types of “fecal pellet”-like aggregates were recognized in the samples.

In spring, the particle fluxes were rather low and higher fluxes were detected in summer. In particular, diatom cell flux increased by two order of magnitude. The composition of the sinking particles varied seasonally; a centric diatom, *Corethron criophilum*, and round-shape fecal pellets accounted for dominant diatom cell and fecal pellet fluxes in the spring. But pennate diatoms and column-shape pellets dominated in summer. The vertical flux varied, too. In spite of the significant difference of total bio-volume flux between spring and summer (>30 times higher in summer), the bio-volume ratio, such as total identified diatoms and fecal pellets, stayed rather constant.

要旨: 1994年の初春(8月12日~9月2日)及び初夏(11月27日~12月17日)の期間に、昭和基地近くに係留したセディメントトラップに捕集された沈降粒子の顕微鏡観察を行った。形状や形態の特徴から識別された沈降粒子ごとの計数及び計測を行い、それぞれの沈降粒子束(フラックス)を見積もった。識別できた沈降粒子は、珪藻類と動物プランクトンの糞と思われる粒子であり、珪藻類として中心目が11属、羽状目が9属、糞粒として4タイプが識別できた。

初春の珪藻類及び糞粒のフラックスは低い値を示したが、初夏になると増加した。特に珪藻細胞数は2桁の増加がみられた。また、珪藻類の優占種及び、糞粒の優占型には、季節遷移が認められた。容積フラックスにおいて、初春には、珪藻類では中心目の *Corethron criophilum*、糞粒では丸型が多かったが、初夏になると珪藻類では羽状目が、糞粒では円筒型が組成は高い割合を示し、水柱平均では30倍以上の増加が認められた。この初春と初夏で容積フラックスの季節的变化を示したが、珪藻粒子と糞粒との容積比を水柱平均にすると、大きな変化が認められなかった。

¹ 東京家政大学, Tokyo Kasei University, Kaga 1-chome, Itabashi-ku, Tokyo 173-8602.

² 国立極地研究所, National Institute of Polar Research, Kaga 1-chome, Itabashi-ku, Tokyo 173-8515.

³ 筑波大学下田臨海実験センター, Shimoda Marine Research Center, Tsukuba University, 10-1, Shimoda 5-chome, Shimoda 415-0025.

1. はじめに

海水が発達する極域の海洋では、太陽光をエネルギーとして行われる基礎生産活動は温帯や熱帯などの海域に比べてより海表面の近くで営まれていると考えられる。これは海水やその上の積雪が太陽光の海中への透過を阻害するためである。この阻害により、海水直下の海中へ透過する光は、植物プランクトンが光合成によって基礎生産活動を営むことが可能な量の下限程度（1% 前後）になる（工藤, 1994, 1996）。結果として基礎生産活動は、海水内部や直下などでのみ可能になる。

基礎生産活動は海表面付近で行われる一方で、極域の海中や海底付近では、オキアミをはじめとする甲殻類や魚類、軟体動物及びウニ類などが極めて多く生活していることが次第に明らかとなってきている。これらは基礎生産物をエネルギー源として利用して生活する“消費者”であるため、表層での基礎生産物の供給がこれら消費者の生存の鍵となる。しかし、定着水中及びその付近で基礎生産された生物群集は、その姿をとどめたまま水中や海底の消費者へ直接供給されてゆくとは限らない。海中内の動物プランクトンをはじめとする一次消費者に捕食され水中から消失したり、捕食後に一次消費者の糞粒様の凝集物として排出され沈降・移送されたり、またその糞をバクテリアや他の分解者が分解し二次的な消費者に再利用されたりして、変質しながら沈降していくものと考えられる。沈降移送過程でのこれらの変質は、基礎生産物の数量や栄養価値の変化を伴う。よって海中や海底において生活を営む生物群集へのエネルギー供給という観点から、海面付近で生じる基礎生産物がどのような状態で供給されるかは極めて重要な意味を持つのである。

この沈降過程の解明のために、第33次日本南極地域観測隊から五カ年計画で、基礎生産物の沈降移送過程に焦点をあてた「海水圏生物総合研究計画」が実施された。本研究では、第35次南極観測隊が定着氷海域で実施した沈降物採集器（セディメントトラップ）係留実験で得た試料を利用し、表層付近で基礎生産活動を営む光合成生物群集（アイスアルジー及び植物プランクトン群集）が、海中及び海底付近へどのような姿で沈降し、移送されているのかを捉えることを目標とした。

これ以前の研究では、海水下での基礎生産者の主な生物群集の種組成 (HOSHIAI and KATO, 1962; FUKUSHIMA and MEGURO, 1966; HOSHIAI, 1977; WATANABE, 1982, 1988), さらに一年を通じた観察結果を基に、炭素量・乾燥重量・光合成色素量などの現存量の季節変動 (FUKUCHI *et al.*, 1984; SATOH *et al.*, 1986; SATOH and WATANABE, 1987) がまとめあげられてきた。またその中でも、早春には海水を主な生活場所とするアイスアルジーが、また最も日射の強まる夏にはアイスアルジーに加え植物プランクトンが定着氷下の海表面近くで大増殖を起こすこと、さらにはそれらの増殖期には海中/底への沈降物量が対応して大きくなることが明らかとなってきた (SASAKI *et al.*, 1986)。これらの極域の海水発達域における研究の

大部分は、基礎生産者の現存量や生産量及び沈降物の総量を定量的に捉えることを主な目標として行われてきた。そのため残念ながら、沈降移送の途中での基礎生産物の性質やその変化に関する知見はこれまでほとんどないのが現状である。そこでこれまでの研究例をもとに、定着氷域において基礎生産活動が開始され始める初春と、大きくなり始める初夏に採集された試料を用いて、沈降物中の主要な要素と考えられる珪藻類と糞粒様の凝集物についての組成と沈降・移送過程での変化の実態を研究した。

2. 材料及び方法

2.1. セディメントトラップ係留実験

南極リュツォ・ホルム (Lützow-Holm) 湾の東部、昭和基地 ($69^{\circ}00'S, 39^{\circ}35'E$) の東方約 2

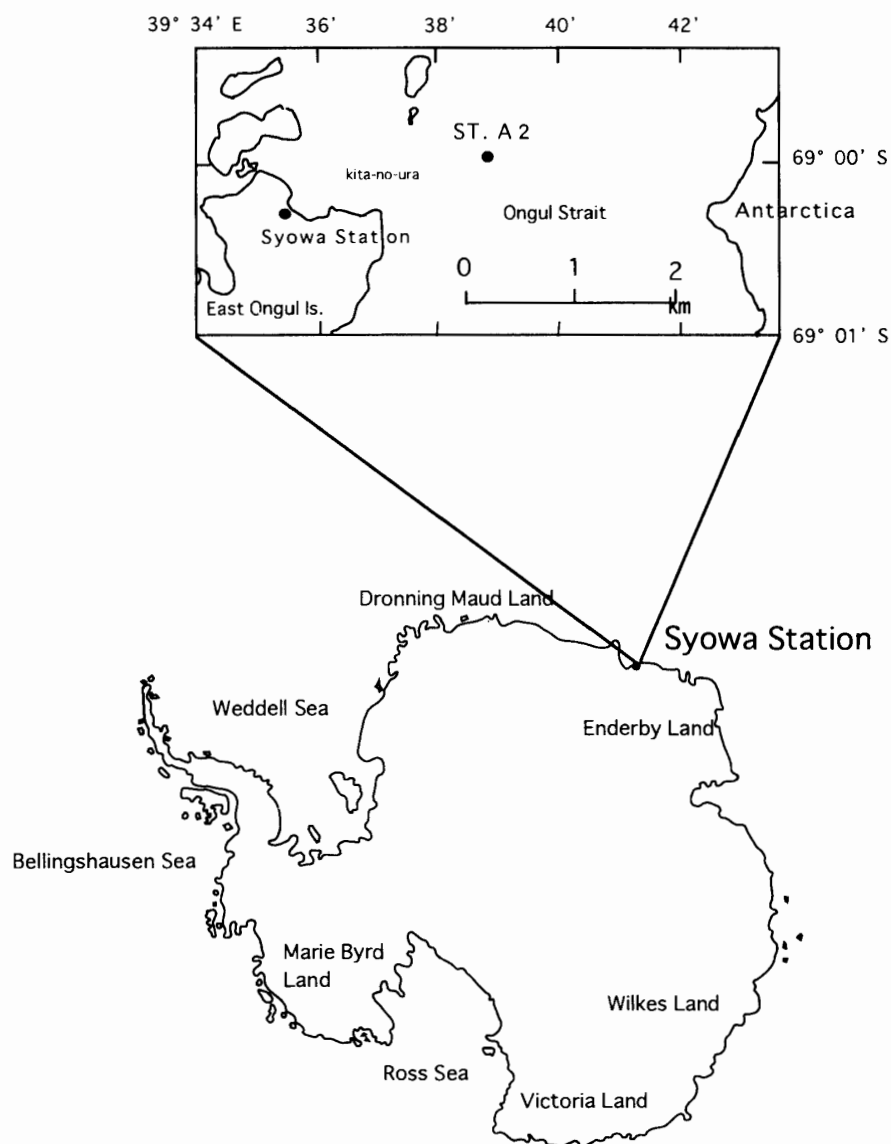


図1 南極大陸の概要と昭和基地の位置関係
Fig. 1. Positions of Syowa Station and ST. A2

km の北の浦に観測定点 A2(69°00'S, 39°38'E, 水深約 160 m) を設け、沈降物試料を採集した(図 1)。この定点付近では 1994 年までの数年ほぼ 1 年中厚さが 1-1.5 m の定着氷に覆われていた。

沈降物の採集は、1994 年 8 月から 12 月の間に合計 4 回実施された。一本のロープに簡易型セディメントトラップ(PVC 製、口径 20 cm) 4 台を、水深 20, 50, 100, 150 m になるように取り付け、海水から吊り下げ、約 1 カ月間係留した。本研究では南極の初春にあたる 8 月 12 日から 9 月 12 日と、初夏の 11 月 27 日から 12 月 17 日の間にそれぞれ水深 20, 100, 150 m から採集された試料を解析に使用した。トラップ捕集ビンにはあらかじめ中性ホルマリン海水(約 10%)を入れ、吊り下げ期間中にトラップ捕集ビン内での生物による分解変化等が起こらないようにした。

2.2. 沈降物組成の観察法

採取した試料は均一に混合させた後に、一部を LEITZ 社製プランクトンチャンバーに沈殿させ、Nikon DIAPHOT 型倒立顕微鏡で観察した。試料中には沈降しやすいものと沈降しにくいものが混在する可能性があったため、試料分注の際にサンプリング誤差が生じないように何度か混合程度を変え、目的の沈降物がほぼ一定の計数値に達するまでくり返し計数した。本研究では特に、珪藻類と糞粒の観察を行った。珪藻細胞の種の判別は、観察倍率を変えたり、位相差・微分干渉顕微鏡を使用し、細胞殻の形や条線などの外部形態の特徴を調べ、既存の報告と照合して行った。倍率 400 倍で種を同定しながら、総細胞数が 1000 個体以上となるまで計数を行い沈降物中の数量を求めた。なお、細胞中に原形質が存在しているものと、細胞殻のみのもとは区別せずに計数した。それぞれの試料中に出現した珪藻類を種別に無作為に 1-28 細胞を選んで、接眼マイクロメータを用いてそれらの外形を計測した。細胞の容積は、中心目珪藻類については円柱近似により、 $(1/2 \times \text{蓋殻面径})^2 \cdot \pi \cdot \text{帯面長}$ で推定し、羽状目珪藻類については顕微鏡写真より蓋殻面積を算出し、帯面厚を乗じて立方近似させ推定した。さらに、それぞれの種の容積に出現数を掛け合わせて種別の出現生物容積を求めた。一部のサイズの計測が不可能だった種に関しては、既存報告を引用した(MEDLIN and PRIDDLE, 1990; HELMCKE and KRIEGER 1953-77; THOMAS, personal communication.)。

糞粒は倍率 200 倍で、プランクトンチャンバーの試料沈殿面の 50% の範囲で観察された糞粒様の凝集物の総数から求めた。糞は形と内容物によって丸型、円筒型及びやや角張って内容物中に羽状目珪藻類を含む「角羽型」と、中心目珪藻類を含む「角中型」の 4 つにタイプ分けした。糞粒のサイズについては、それぞれの試料中の出現数の多少に応じて 1-18 凝集物を計測し、タイプ別に平均値を求め、それらの代表値とした。更にそれぞれの糞粒を立方近似させて容積を推定した。

3. 結 果

3.1. 沈降物組成

すべての沈降物試料中には、珪藻細胞、動物プランクトンの糞粒及び不定形の凝集物が存在していた。このうち不定形の凝集物については、その起源を特定することができなかった。本研究では計数及びサイズ測定は行わなかった。

8月12日から9月12日（初春）の試料中で識別できた珪藻類は、中心目珪藻類が11属、羽状目珪藻類は8属であり、これらのうち種レベルまで同定できたのは、前者で5種、後者

表1 初春に採集された珪藻類

Table 1. Diatom cells collected with sediment trap in early spring. Blanks indicate no data, asterisks (*) in the cell volume column are data from previous reports (see text), and double asterisks (**) indicate that the density is too low to permit estimates.

Taxa	Valval diameter (μm)	Girdle length (thickness) (μm)		Cell volume ($10^4 \times \mu\text{m}^3$)
Centrales				
<i>Actinocyclus atinophilus</i>	50.0 \pm 16.1			*2.29
<i>Asteromphalus</i> sp.	35.9 \pm 5.39			*1.38
<i>Chaetoceros</i> spp	23.01 \pm 9.78	24.22 \pm 8.38		*1.20
<i>Corethron criophilum</i>	43.7 \pm 13.9	102.2 \pm 50.5		8.16
<i>Coscinodiscus</i> / <i>Thalassiosira</i> spp	72.6 \pm 57.7			*9.48
<i>Dactyliosolen antarcticus</i>	46.0	61.7		10.3
<i>Eucampia balausium</i>	47.2 \pm 11.3	66.5 \pm 21.2		*0.87
<i>Odontella</i> sp.	57.1 \pm 25.3	65.0 \pm 21.5		24.2
<i>Rhizosolenia</i> sp.	16.9	241		5.41
<i>Thalassiosira australis</i>				**
Taxa	Apical length (μm)	Pelvalvar length (μm)	Girdle thickness (μm)	Cell volume ($10^4 \times \mu\text{m}^3$)
Pennales				
<i>Amphiprora kufferarhii</i>	102 \pm 33.4		42.4 \pm 14.3	*0.06
<i>Berkeleya adeliensis</i>	52.2 \pm 3.92	9.79 \pm 1.40		0.32
<i>Cocconeis</i> sp.	42.4	31.5		*0.57
<i>Gomphonema</i> sp.	57.1 \pm 9.11	7.14 \pm 1.15	5.23 \pm 0.99	0.17
<i>Navicula</i> spp	35.6 \pm 11.6	10.1 \pm 3.56	4.84	0.20
<i>Nitzschia curta</i>	28.3 \pm 7.22	7.16 \pm 1.31	6.65	0.10
<i>N. stellata</i>	99.5 \pm 15.5	9.45 \pm 1.31	7.26 \pm 0	0.60
<i>N. turgiduloides</i>	123 \pm 16.6	5.45 \pm 1.21	4.24 \pm 1.40	0.23
<i>N. (Sect. Fragilariopsis)</i>	61.5 \pm 26.8	14.7 \pm 6.23	7.26 \pm 2.30	0.94
<i>N. spp</i> ①	75.0 \pm 24.4	4.03 \pm 1.16	5.45	0.09
<i>N. spp</i> ②	63.2 \pm 9.77	6.46 \pm 1.33		0.23
<i>Pinnuralia quadratarea</i> var. <i>bicunaeta</i>	74.3 \pm 11.2	20.7 \pm 2.07		*0.36
<i>Pleurosigma directa</i>	170	20.6		*1.61

空白: 計測に適さない状態で沈殿していてデータを取るのが困難だったもの

*: 文献等から値を引用して容積推定を行ったもの

**: 容積算出ができなかったもの

で9種であった(表1)。種の同定ができなかったものについても、形態的特徴と細胞サイズからできる限り識別して、後の計数とサイズ測定を行った。これらのうち中心目珪藻類の *Chaetoceros* spp, *Eucampia balausium*, *Thalassiosira australis* は群体をつくる種であり、顕微鏡観察時には群体で観察されたほか、単体としても数多く存在していた。観察された中心目珪藻類中、*Chaetoceros* spp が最も小型(帯面長 24.2 μm)で、最大であったのは、*Rhizosolenia* sp. (帯面長 241 μm)であった。また羽状目珪藻類では *Amphiprora kufferarhii*, *Berkeleya adeliensis*, *Nitzschia stellata*, *N. turgiduloides*, *N. (Sect. Fragilariopsis)*, の6種が、群体をつくったまま沈降粒子中に含まれていた。羽状目珪藻類は、中心目珪藻類に比べて小型のものが多かった。

一方11月27日から12月17日(初夏)の試料中の珪藻類は、中心目珪藻類が7属、羽状目珪藻類が8属で、種レベルまで同定できたのは前者で4種、後者で9種であった(表2)。初夏試料中の中心目珪藻類は初春のものよりも観察できた種類数が減っていたが、初春には

表2 初夏に採集された珪藻類

Table 2. Same as Table 1 but for diatom cells collected with sediment trap in early summer.

Taxa	Valval diameter (μm)	Girdle length (thickness) (μm)		Cell volume ($10^4 \times \mu\text{m}^3$)
Centrales				
<i>Asteromphalus</i> sp.	31.5			*0.80
<i>Corethron criophilum</i>	58.1	174		40.9
<i>Coscinodiscus</i> / <i>Thalassiosira</i> spp	49.6			*3.60
<i>Eucampia balausium</i>				**
<i>Porosira pseudodenticulata</i>	45.4 \pm 9.95	55.1 \pm 9.14		7.28
<i>Thalassiosira australis</i>	31.9 \pm 6.58	43.5 \pm 10.2		4.91
Taxa	Apical length (μm)	Pelvalvar length (μm)	Girdle thickness (μm)	Cell volume ($10^4 \times \mu\text{m}^3$)
Pennales				
<i>Amphiprora kufferarhii</i>	74.4 \pm 22.1		38.1 \pm 11.0	*0.04
<i>Berkeleya adeliensis</i>	56.1 \pm 5.26	9.42 \pm 1.46	7.26 \pm 1.40	0.32
<i>Gomphonema</i> sp.	52.7 \pm 7.68	6.66 \pm 1.17	6.05 \pm 1.40	0.17
<i>Haslea trompii</i>	274 \pm 25.6	20.0 \pm 2.51		*0.09
<i>Navicula</i> spp	37.5 \pm 9.95	9.06 \pm 1.47	7.54 \pm 0	0.20
<i>Nitzschia curta</i>	22.2 \pm 4.78	7.26 \pm 1.38		*0.10
<i>N. stellata</i>	95.1 \pm 10.7	11.2 \pm 1.90	9.41 \pm 21.1	0.42
<i>N. turgiduloides</i>	111 \pm 21.1	5.34 \pm 2.81	6.94 \pm 1.62	0.38
<i>N. (Sect. Fragilariopsis)</i>	48.5 \pm 17.2	5.49 \pm 1.14	5.76	0.94
<i>N. spp</i> ①	62.8 \pm 14.6	5.76 \pm 1.89	9.89	0.09
<i>N. spp</i> ②	51.1 \pm 16.6	9.89 \pm 1.25	12.0 \pm 14.3	0.13
<i>Pinnuralia quadratarea</i> var. <i>bicunaeta</i>	85.1 \pm 7.26	19.6 \pm 4.33		*0.37
<i>Pleurosigma directa</i>	148	24.2		*0.95

空白: 計測に適さない状態で沈殿していてデータを取るのが困難だったもの

*: 文献等から値を引用して容積推定を行ったもの

**: 容積算出ができなかったもの

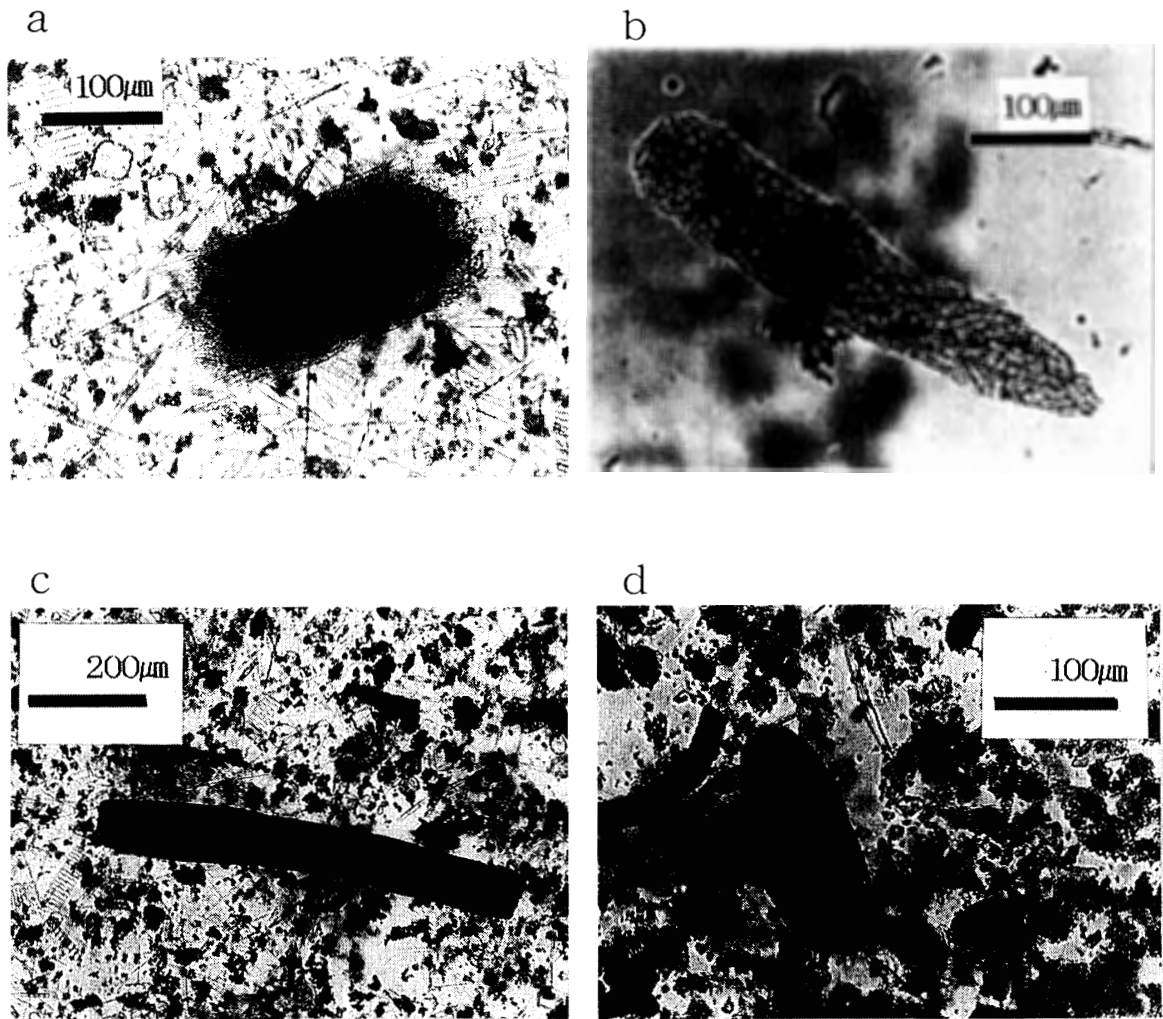


図2 糞粒様凝集物. a, b, c: 円筒型, d: 丸型
 Fig. 2. "Fecal pellet"-like particles observed in the early spring samples.
 Column-shape type (a, b, c) and round-shape type (d).

みられなかった群体をつくる *Porosira pseudodenticulata* が出現した。これら中心目珪藻類の最小サイズは, *Asteromphalus* sp. (蓋殻面径 $31.5 \mu\text{m}$) で, 最大サイズは, *Corethron criophilum* (蓋殻面径 $58.1 \mu\text{m}$) であった。また羽状目珪藻類では初春にみられた *Cocconeis* spp が姿を消し, 新たに *Haslea tromptii* が出現した。これら羽状目珪藻類の最小サイズは *Nitzschia curta* (蓋殻面径 $22.2 \mu\text{m}$), 最大サイズは *Haslea tromptii* (蓋殻面径 $274 \mu\text{m}$) であった。

初春には, 円筒型及び丸型糞粒が観察された(図2)。円筒型(図2a, b, c)は *Nitzschia* sp. の殻がよく見える半透明のものと, 密度が濃く内容物の判別ができないものとの2種類が観察されたが, ここでは同じグループとして扱った。丸型(図2d)は楕円球形で不定形の凝集物に比べれば, 形がはっきりとしていた。大きさについては大幅にバラついてはいたが円筒型は平均 $213 \pm 120 \mu\text{m}$ の長さがあり, 丸型はそれよりも小さく平均直径が $65.9 \pm 98.9 \mu\text{m}$ であった(表3)。初夏になると初春にみられた型に加えて, 角羽型と角中型が出現していた。

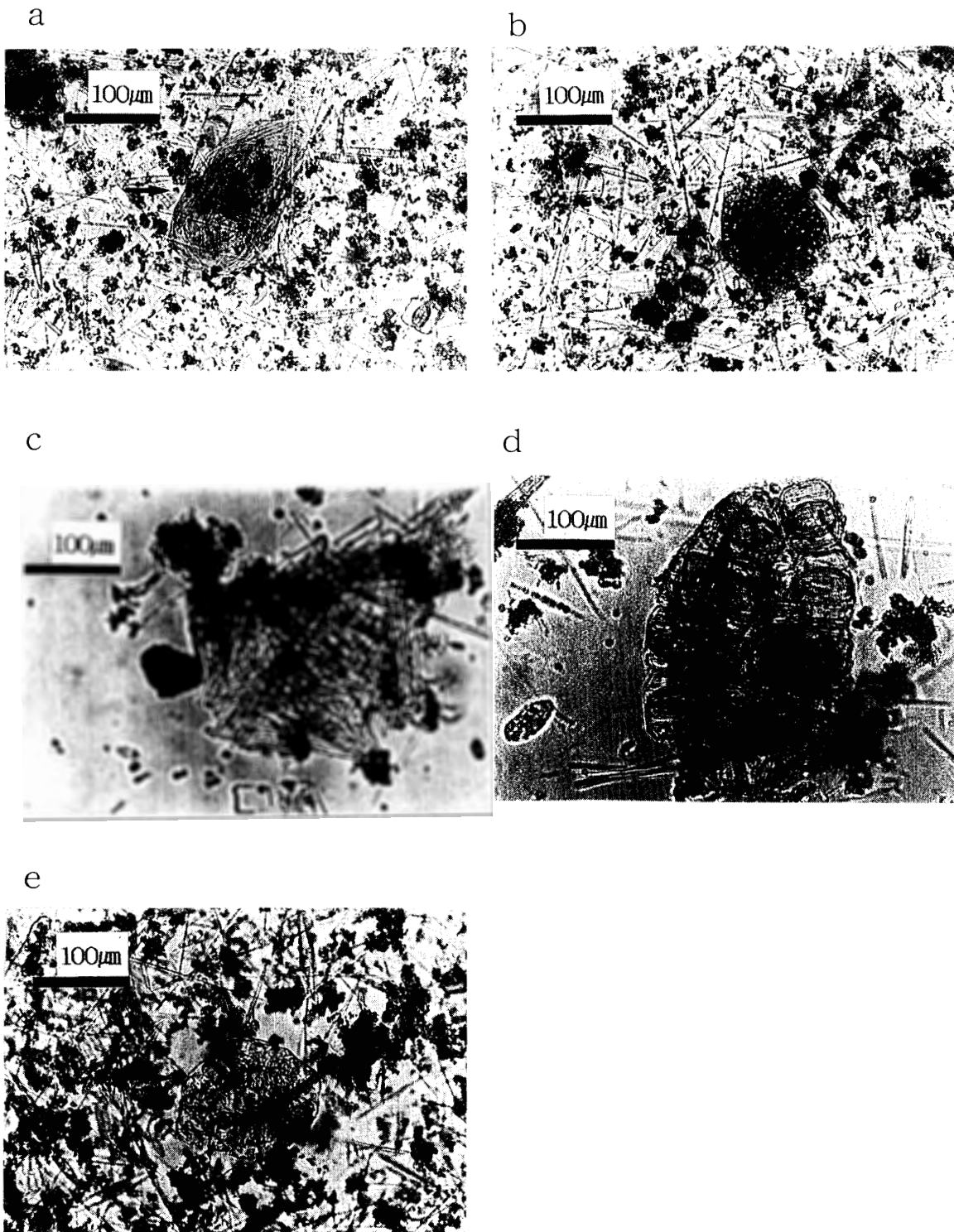


図3 糞粒様凝集物。 a, b, c: 角型 (羽状目); d, e: 角型 (中心目)
Fig. 3. "Fecal pellet"-like particles observed in the early summer samples.
Pennate diatom type (a, b, c) and centric diatom type (d, e).

表3 初春及び初夏に採集された糞粒様凝集物
 Table 3. "Fecal pellet"-like sinking particles collected in the early spring (upper) and in the early summer (lower) in 1994.

	Long diam (μm)	Short diam (μm)	Bio-volume ($10^5 \times \mu\text{m}^3$)
Early spring			
Column-shape	213 \pm 120	73.4 \pm 28.5	5.61
Round shape	169 \pm 59.8	65.9 \pm 98.8	3.29
Early summer			
Column-shape	476 \pm 360	140 \pm 112	86.1
Round shape	152 \pm 76.4	73.3 \pm 47.1	5.59
Pennate diatom type	194 \pm 57.8	143 \pm 29.7	21.9
Centric diatom type	103 \pm 92.4	84.5 \pm 72.7	10.0

角羽型 (図 3a, b, c) は、外形が不規則な多角形で半透明の膜に包まれ羽状目珪藻類が内部に詰まっていたものを識別したものである。角中型 (図 3d, e) は同じく角張った不規則な形をしているが、中心目珪藻類が内部に多量に存在しているという点で、前者と区別したものである。初春と共通してみられた円筒型と丸型凝集物のうち、円筒型凝集物のサイズが初春よりも 2-2.5 倍ほど大きくなっていた (表 3)。

3.2. 採取水深及び採取時期による沈降物の数にみられる特徴

初春の全珪藻細胞数のフラックス (1日・1m²あたりの沈降細胞数) は、水深 150 m で最大となっており、20 及び 100 m におけるフラックスの 1.5-2 倍に達していた (図 4)。この全珪藻細胞数のフラックスの 86% 以上を羽状目珪藻類が占めていた。羽状目珪藻類のうち、どの水深でも *Nitzschia stellata* が最も数多く観察され、水深 20 m では全珪藻細胞数フラックスの 82% を占めていた。中心目珪藻類も水深 150 m で最大フラックスを示したが、それ以外では羽状目珪藻類と比べると著しくフラックスが小さかった。

一方、初夏の全珪藻細胞数フラックスは、初春試料に比べて 2 桁の増加がみられた。初夏には *Nitzschia turgiduloides* のフラックスが最も大きく、次いで *N. curta*, *N. stellata*, *N. turgiduloides*, *N. (Sect. Fragilariopsis)*, *N. spp* ① が数多く観察された。初春以上に沈降していた珪藻細胞のほとんどを羽状目珪藻類が占め、中心目珪藻類は水深 100 及び 150 m で総計数値のわずか 2-3% を占めるのみであった。また最大細胞数フラックスは初春よりも上層の水深 100 m で認められた。

初夏試料中の *N. stellata*, *N. turgiduloides*, *N. (Sect. Fragilariopsis)* の細胞数フラックスは、水深による数の変化がほとんどなく、全細胞数フラックスにおいてもこの 3 種で半分またはそれ以上を占めた。また中心目珪藻類については、*Thalassiosira australis* が細胞数フラックスの大部分を占め、水深 20 m でやや小さく、水深 100, 150 m では $31.0-37.2 \times 10^4$ cells/m²/day となっていた。

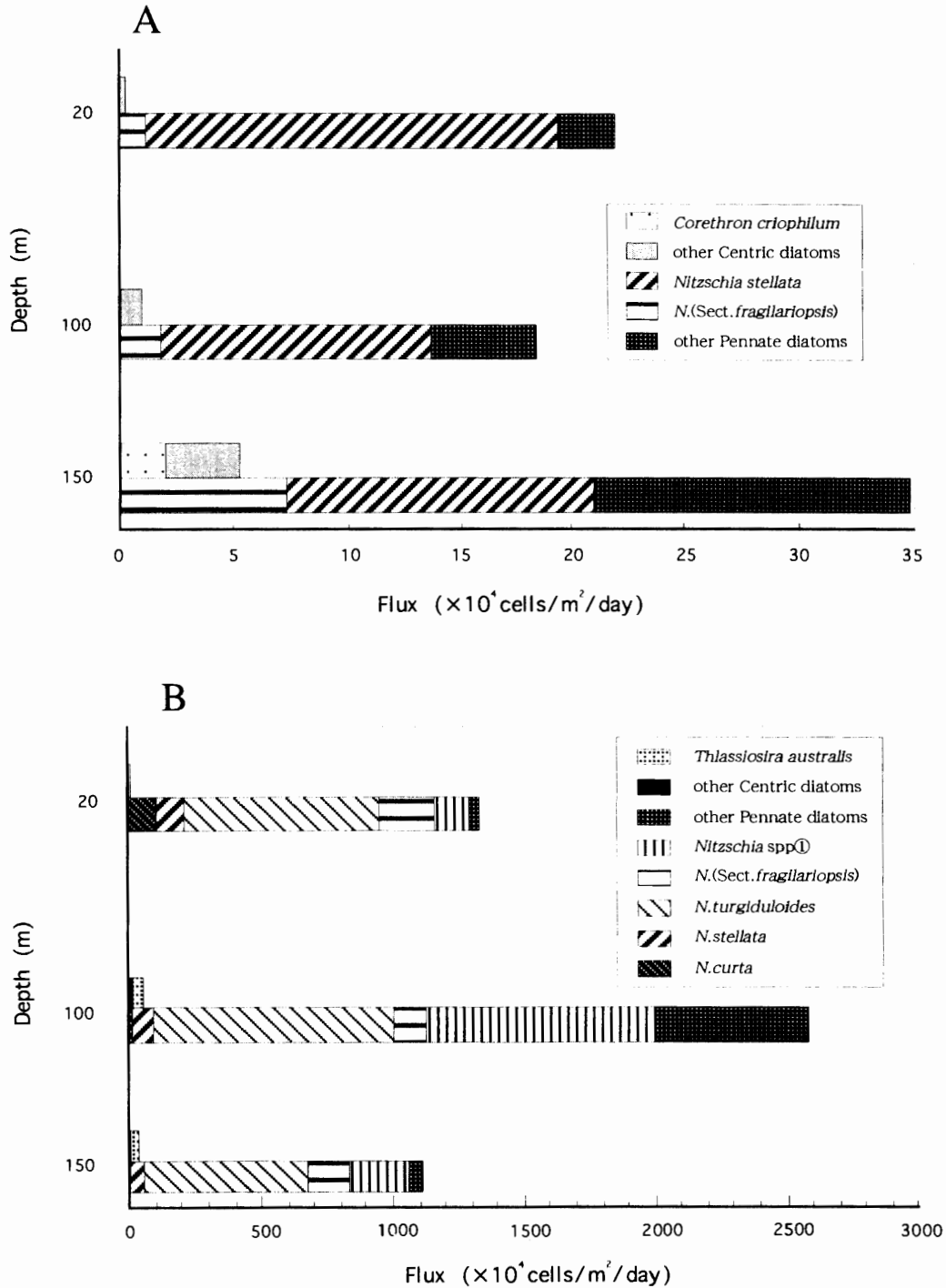


図4 中心目と羽状目珪藻類の主要な種の細胞数沈降粒子束. A: 初春; B: 初夏
 Fig. 4. Cell flux of major diatoms. A: Early spring; B: Early summer.

初春の糞粒様凝集物数のフラックスは、円筒型、丸型どちらも水深 20 m よりも 100 m でわずかながら少なく、水深 150 m で最大となっていた (図 5)。このうち丸型の糞粒様凝集物が大多数で、どの水深でも円筒型の糞粒様凝集物の 3 倍以上の値を示した。また初夏の総凝集物数のフラックス自体は、採集された水深によらずほぼ一定であったが、型別にみると角

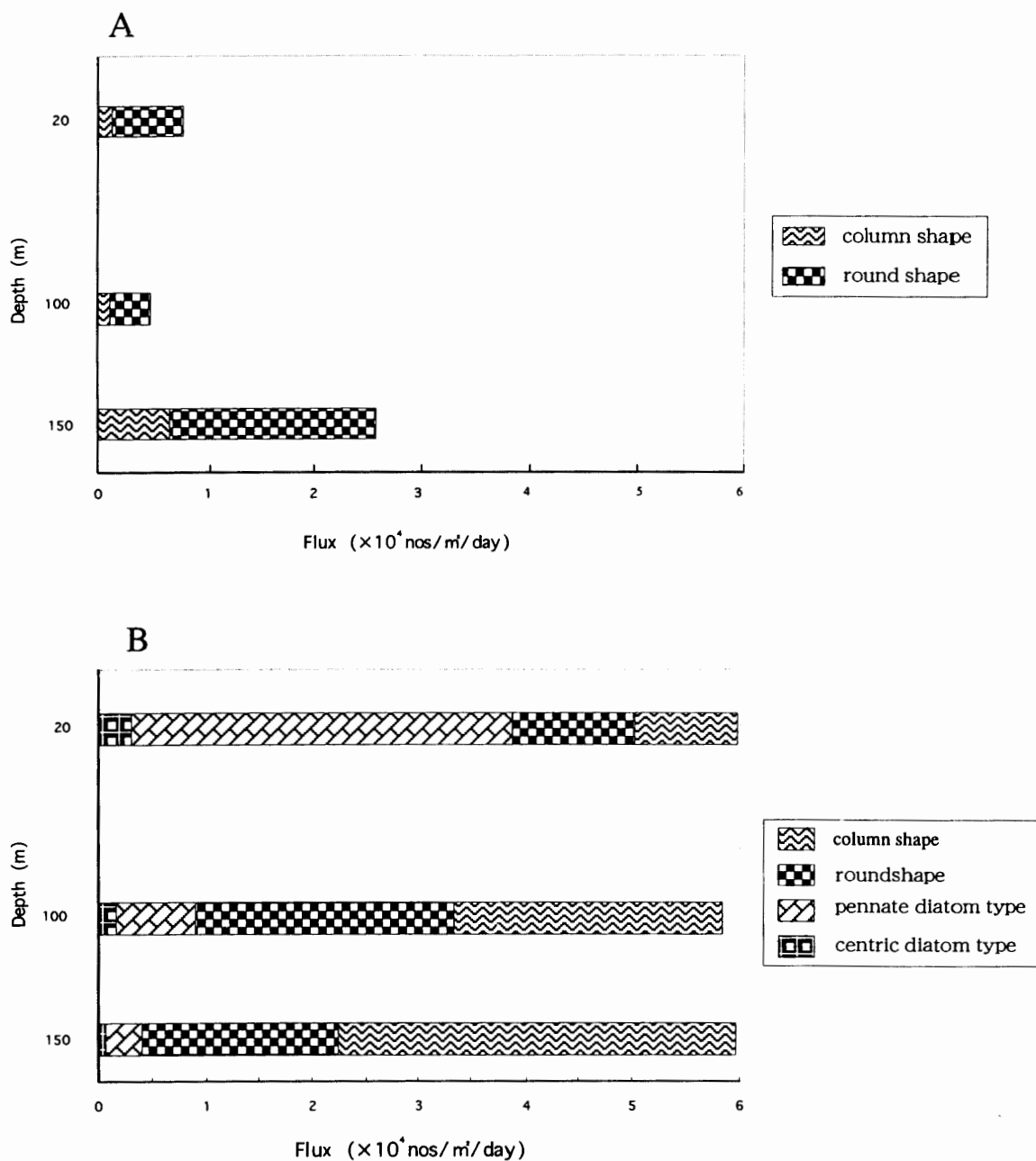


図5 糞粒様凝集物数の沈降粒子束. A: 初春; B: 初夏

Fig. 5. Flux of "fecal pellet"-like particle numbers. A: Early spring; B: Early summer.

羽型及び角中型の凝集物数のフラックスは水深が増すと共に減少し、円筒型と丸型のは逆に増加するという変化が認められた。相対出現率からみると、特に円筒型は水深 20 m で全凝集物の 16% だったものが、水深 150 m では 63% にまでも上り、逆に角羽型の数フラックスは水深 20 m で全数の 60% を占め、水深 150 m では約 6% 弱まで低下していた。

3.3. 沈降物の容積量にみられる特徴

それぞれの水深での種別のサイズ測定結果及び写真撮影に基づいた各々の種の個々の細胞

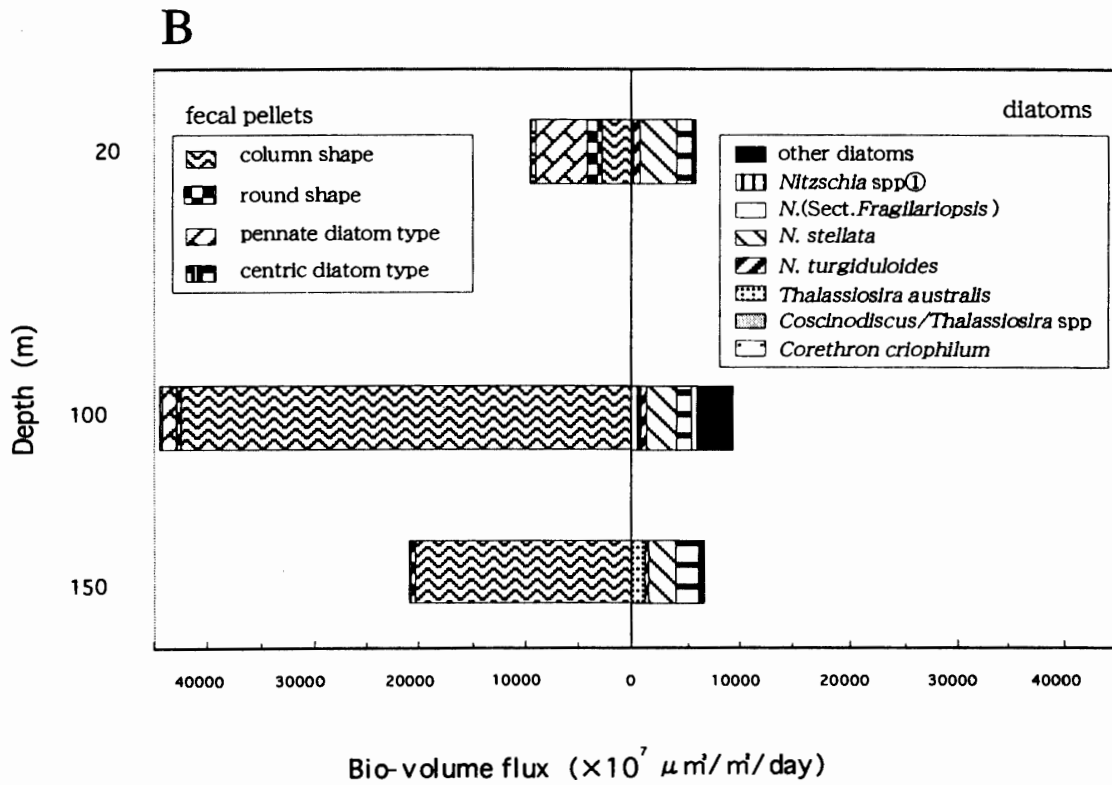
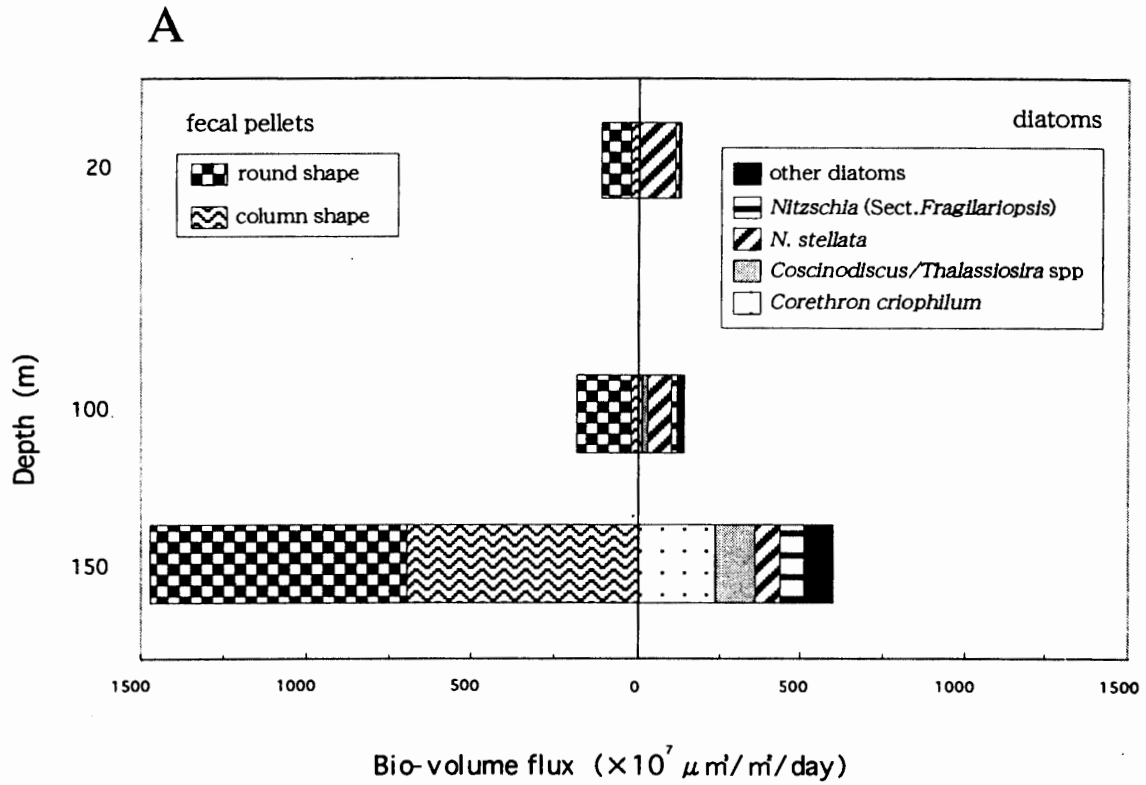


図6 珪藻類と糞粒の容積沈降粒子束. A: 初春; B: 初夏

Fig. 6. Bio-volume flux of diatoms and "fecal pellet"-like particles. A: Early spring; B: Early summer.

容積平均値を推定し、細胞数のフラックスと掛け合わせて種ごとに生物容積のフラックスを求めた（表1・2, 図6）。

初春の全珪藻類生物容積は、全珪藻細胞数のフラックスと同様に水深150 mで中心目・羽状目珪藻類共に最大となり、それ以浅に比べて顕著に大きくなっていった。この増加に大きく寄与したのは中心目珪藻類であり、水深150 mで生物容積のフラックスがそれ以浅の約11倍となり、羽状目珪藻類のフラックスを上回るまでになっていた。この中でも *Corethron criophilum* の寄与が際立ち、水深150 mの試料中では $2.33 \times 10^9 \mu\text{m}^3/\text{m}^2/\text{day}$ 、全珪藻容積中39.4%となり、一種の占める割合としては全珪藻生物容積のフラックス中最大であった。またこの水深では、*Coscinodiscus/Thalassiosira* sppの生物容積も大きくなっていった。これに対し数多く存在していた羽状目珪藻類の *Nitzschia stellata* は、水深20 mで生物容積フラックスが $1.08 \times 10^9 \mu\text{m}^3/\text{m}^2/\text{day}$ で全珪藻生物容積中の85%、水深100 mでも54%と大半を占めた。しかし水深150 mでは容積フラックス自体はそれ以浅とほとんど変化していないにも関わらず、相対的には中心目珪藻類の増加のため羽状目中第2位の相対出現率であった、*N.* (Sect. *Fragilariopsis*) とほぼ同等の10%強まで大幅に減少していた。

一方初夏になると、珪藻類の生物容積フラックスはいずれの水深で採集された試料でも初春の10倍以上の増加が見られた。初春においては、水深150 mで中心目珪藻類の相対的増加が目についたが、この季節ではどの水深でも羽状目珪藻類が相対的に大きかった。また初春にみられたように最深部での捕集量が増えるという傾向は見られず、いずれの水深でもほぼ均一な採集量であった。また数フラックスと同様に、*Nitzschia stellata*, *N. turgiduloides*, *N.* (Sect. *Fragilariopsis*) の1属3種が容積フラックスでも大多数を占め、この3種合計の生物容積フラックスは、羽状目珪藻類の中のみならず全珪藻類中においても、どの水深でも50%以上を占めていた。その中でも *N. turgiduloides* が高い割合を占めた。*N. turgiduloides* は水深20 mで $3.50 \times 10^{10} \mu\text{m}^3/\text{m}^2/\text{day}$ の最高値を示したが、水深が増すごとにやや生物容積フラックスが減少した。水深と共にフラックスが減る傾向は *N. stellata* にもみられた。*N.* (Sect. *Fragilariopsis*) の生物容積フラックスは、水深100 mで相対的にやや小さかったものの(14%)、水深20, 150 mでは全体の20-30%を占めていた。また細胞数フラックスでは際立っていた *N. curta* と *N.* spp ①は、細胞サイズが小さいため生物容積としては小さくなり、図6中ではその他羽状目珪藻類として表現してある。中心目珪藻類は、*Thalassiosira australis* の生物容積が、水深100 mと150 mの試料で $1.0 \times 10^{10} \mu\text{m}^3/\text{m}^2/\text{day}$ とやや大きな値をとったものの、わずかに全珪藻中の15%程度であった。

糞粒様の凝集物の容積フラックスを見ると、初春は数フラックス同様水深150 mでの容積フラックスが特に大きく、それ以浅の7倍の値を示した。そのうち円筒型の容積フラックスは、水深150 mで20及び100 mで捕らえられたものの約30倍にもなり、全糞粒様の凝集物容積フラックスの1/2程にまで達していた。数の上で大多数であった丸型の糞粒様の凝集物

容積フラックスは、水深 20, 100 m の糞粒様の凝集物沈降物中の3/4以上を占め、比較的浅層での主要な構成要素となっていた。

糞粒様凝集物の初夏の全容積フラックスは、珪藻類と同様に初春のものに比べて大幅に増加していた。これらの数フラックス全体に水深変化があまり見られなかったのに対し、容積フラックスの水深変化は著しく、水深 100 m で水深 20 m の 3.5 倍になり、水深 150 m で 100 m の1/2に減少していた。これは捕集された水深により、凝集物サイズが異なっていたことを反映したものである。採取量が最大となった水深が初夏になると浅くなっていた傾向は、珪藻類と同様である。水深 20 m では角羽型が全容積フラックスの約 50% を占めていたが水深が増すとともに減少し、これに代わって水深 100, 150 m では円筒型の糞粒様の凝集物が 90% 以上を占めた。また角中型も水深が増すとともに減少し、全量に占める割合は小さくなった。初春にそのほとんどを占めた丸型は、水深 20 m で 13.6% を占めたのを最高として他の水深では極めて少なかった。

珪藻類と糞粒様凝集物の容積フラックスを比較すると、初春は 20, 100 m 層で珪藻類と糞粒様凝集物がほぼ同等で、水深 150 m では凝集物が珪藻類の 2.5 倍の量にまで達していた。初夏には、どの水深においても糞粒様の凝集物としての沈降量がやや大きく、珪藻類の 1.5-5.5 倍程度となっていた。

4. 考 察

南極昭和基地付近における日射量は、7月の中旬から徐々に増し始め、12月から1月にピークをむかえる(星合, 1982)。8月には日射の増加に伴い、それまで厚さを増していた海水の成長速度も緩やかになり、海水下部でアイスアルジー群集の発達を開始されるようになる(SATO and WATANABE, 1987; 渡辺, 1996)。水中の植物プランクトン現存量は、それよりも約一カ月遅れの9月に入ってから増加が認められ、一般的に1月末から2月はじめに最大となる。このとき水中で捕らえられる微細藻類の現存量は、冬から初春の量の50-100倍の増加があることが知られている(星合, 1969b; FUKUCHI *et al.*, 1984; SATO *et al.*, 1986; 渡辺, 1990)。この現存量の増加には、海中の植物プランクトン群集の増殖及び海水から遊離したアイスアルジー群集が加わった、相乗的なものが貢献していると考えられる。

本研究に用いた試料を採集した昭和基地周辺の定着水下における沈降物量は、これまでの研究から、冬から初春が一年のうちでも最も少ない時期に当たり、南極域の夏に相当する1月頃に最大となることが知られている(佐々木, 私信)。本研究では、沈降物量が最小の時期に相当する初春に表層付近のトラップに数多く *N. stellata* が捕集された。本種は昭和基地の定着水下のアイスアルジー群集としてはもちろん(渡辺, 1990)、南極の海水域でごく普通に認められるアイスアルジーであるが、まだ海水の融解が顕著に生じていないこの時期に既に表層の沈降物として捕集されていたことは、非常に興味深いことである。なぜなら見た目上

海水の成長は停滞している初春の状況において、既にアイスアルジーが水中へ離脱供給されている証拠と考えられるからである。太陽エネルギー供給の日周性を考えると、海水は日中には融解が、夜間は成長が起こって見た目上平衡化すると考えられ、これらの融解と凍結に伴った海水からの融解水やブラインの排出などによって、アイスアルジー群集の一部が物理的に海中へ離脱していたと推察される。さらに8月以降、海水下部でアイスアルジー群集の発達が始まるといふ結果から見ると(福地, 1982; FUKUCHI *et al.*, 1984), *N. stellata* はアイスアルジー群集の発達初期の優占種であり、それが初春の海水の融解/再凍結過程に伴って海中へ離脱・沈降していた可能性もある。

海水の融解が顕著になる初夏になると、沈降試料中の珪藻類は昭和基地周辺でアイスアルジー群集として報告されている種が大部分を占めていた。ただし、初春に多かった *N. stellata* は数の上ではそれ程多くなく、これに代わって同属の *N. turgiduloides* などが大多数を占めていた。この種組成比の変化は、アイスアルジー群集構成種組成の季節的な変動を反映したものと考えられ、同海域でのアイスアルジー群集の優占度が1~3カ月程度の間隔で季節的に移り変わっていくという渡辺(1988)の研究結果と対応するものである。今後更に厳密な観測を実施し、海水の生成が停滞する頃から融解期のアイスアルジー群集の遷移や海水から水中への離脱供給の真偽を確認していく必要がある。

珪藻細胞としてそのまま沈降していたものの細胞容積は、初春では *Corethron criophilum*, 初夏では *Nitzschia turgiduloides* をはじめとする *Nitzschia* 属珪藻類が割合として大きかった。初春の深部で顕著だった *C. criophilum* は、南極の浮氷帯や外洋域で現存量が大きな植物プランクトンである(渡辺, 私信)。これらと今回の試料中で本種が表層ではほとんど沈降物として捕集されずに深部でのみ捕集されたということとを考慮すると、この種は前の夏~秋に植物プランクトンとして増殖したものが初春まで深部で残存していたか、あるいは他の海域から移送されてきたと考えた方が妥当であるように思われる。また初夏において容積フラックスとして顕著だったアイスアルジー起源と考えられる *Nitzschia* 属珪藻類は、全珪藻細胞容積フラックスの8割ほどを占めたことから、これらが沈降物中の主要な要素となっていることは疑いない。

一方、糞粒様凝集物数のフラックスにおいても珪藻類と同様に初春に比べて初夏に増加傾向が見られ、また種類も増加し、さらにサイズも大型化していた。これらのことは、仮にこの凝集物が全て動物プランクトンの糞粒だとすると、初春と初夏で動物プランクトン群集に何らかの変化が生じていたことを意味するものと思われる。考えられる変化としては、初春には初夏に観察された角羽型及び角中型の糞をする動物プランクトンが存在していなかったか、存在しても顕著な捕食活動をしていなかった可能性があること、また、初夏には円筒型や丸型の糞をする動物プランクトンが成長してより大型の糞をするようになったか、あるいは初春には水中の餌となる微細藻類が少なすぎて大きな糞となり得なかった、ということが

上げられる。昭和基地周辺の定着水下における動物プランクトンの季節変化に関しては、数週間程度で優占する種組成が変化し、また水中での餌量の増加に伴って夏季には橈脚類などが成長し体サイズが大型化することが報告されている (FUKUCHI and SASAKI, 1981; FUKUCHI and TANIMURA, 1981)。今回の糞粒様の凝集物タイプが夏に増えたことと糞粒様の凝集物のサイズが大型化したことに、これらの動物プランクトン組成の季節的变化と成長が何らかの関係していたと思われる。

本研究で観察された沈降物の生物容積は、初春試料と初夏のものとの間で、水柱平均で30倍以上の増加が認められた。この増加は、星合 (1982) が報告している水中の微細藻類現存量の季節変動に見られるものよりもわずかに小さい変動幅のものである。本研究では水中の微細藻類現存量が1年のうちでも最低となると予想される早春の水中平均沈降物量として、珪藻類は $3 \mu\text{m}^3/\text{m}^2/\text{day}$ 、糞粒様の凝集物はその約2倍の容積 ($6 \mu\text{m}^3/\text{m}^2/\text{day}$) と推定され、それが水中の微細藻類の増加に伴って、初夏には珪藻類で $72 \mu\text{m}^3/\text{m}^2/\text{day}$ 、糞粒様の凝集物は実に $250 \mu\text{m}^3/\text{m}^2/\text{day}$ 以上に達していたのであるが、盛夏を迎え海水融解が更に進めば、おそらくこれらのフラックスはより大きくなると推察される。

生物容量フラックスの季節的变化の一方で、珪藻粒子として沈降したものと糞粒様の凝集物として沈降したものの容積の比率は、水柱平均では初春と初夏でそれ程変化していなかった。両者の試料とも、確認し得たフラックスのうち水柱平均値では約1/3が珪藻細胞として、約2/3が糞粒様の凝集物として沈降していたことになる。ただし、水深別に珪藻細胞と糞粒様の凝集物の生物容積フラックスの割合を見ると、いずれの季節でもより深部で得られた試料中で糞粒様の凝集物の割合が大きくなっていった。このことは、珪藻類をはじめとする基礎生産者が沈降過程で動物プランクトンに捕食利用され糞となるか、物理的に凝集してより深部に移送されていくことを強く示唆するものである。

謝 辞

本研究は、第IV期五カ年計画、生物・医学部門「海水圏生物総合研究計画」の中で企画・実行されたもので、第35次越冬観測隊により得られた試料を分析したものです。海氷上の野外作業にご支援いただいた皆様に感謝します。また、本報告を作成するにあたり、国立極地研究所小達恒夫助教授にご指導いただき、石巻専修大学佐々木洋助教授には、貴重な情報の提供とご助言をいただきました。また、研究実施期間中、公私にわたりお世話になった生物部門の皆様にもあわせてお礼申し上げます。

文 献

- 福地光男 (1982): 南極の科学, 7 生物. 東京, 国立極地研究所, 96-114.
FUKUCHI, M. and SASAKI, H. (1981): Phytoplankton and zooplankton standing stocks and downward flux of particulate material around fast ice edge of Lützow-Holm Bay, Antarctica. Mem. Natl Inst. Polar Res.,

- Ser. E (Biol. Med. Sci.), **34**, 13–36.
- FUKUCHI, M. and TANIMURA, A. (1981): A preliminary note on the occurrence of Copepods under sea ice near Syowa Station, Antarctica. Mem. Natl. Inst. Polar Res., Ser. E (Biol. Med. Sci.), **34**, 37–43.
- FUKUCHI, M., TANIMURA, A. and OHTSUKA, 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.
- HELMCKE, J.-G. and KRIEGER, W. (1953–77): Diatomeenschalen im elektronenmikroskopischen Bild. Parts 1–10. [1023 sets of electron micrographs], J. CRAMER, Berlin.
- HORNER, R. A. and SCHRADER, G. C. (1982): Relative contributions of ice algae, phytoplankton and benthic microalgae to primary production in nearshore regions of the Beaufort Sea. Arctic, **4**, 485–503.
- 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.
- HOSHIAI, T. (1977): Seasonal change of ice communities in the sea ice near Syowa Station, Antarctica. Polar Oceans, ed. by M. J. DUNBAR. Calgary, Arctic Institute of North America, 307–317.
- 星合孝男 (1982): 南極の科学, 7 生物. 東京, 国立極地研究所, 84–96.
- HOSHIAI, T. and KATO, M. (1962): Ecological notes on the diatom community of the sea ice in Antarctica. Bull. Mar. Biol. Stn. Asamushi, **10**, 221–230.
- 工藤 栄 (1994): 北方海洋生態系の特徴. 日本生態学会誌, **44**, 115–124.
- 工藤 栄 (1996): 海水生態系—サロマ湖に冬季に発達する季節海水生態系を例に—. 海洋と生物, **18**, 21–27.
- LALLI, C. M. and PARSONS, T. R. (1996): 生物海洋学入門. 関文威監訳. 東京, 講談社サイエンティフィック, 220 p.
- MEDLIN, L. K. and PRIDDLE, J. ed. (1990): Polar Marine Diatoms. Cambridge, British Antarctic Survey, 214 p.
- SASAKI, H. and HOSHIAI, T. (1986): Sedimentation of microalgae under the Antarctic fast ice in summer. Mem. Natl. Inst. Polar Res., Spec. Issue, **40**, 45–55.
- SASAKI, H. and WATANABE, K. (1984): Underwater observation of ice algae in Lützow-Holm Bay, Antarctica. Nankyoku Shiryô (Antarct. Rec.), **81**, 1–8.
- SATOH, H., WATANABE, K., KANDA, H. and TAKAHASHI, E. (1986): Seasonal changes of chlorophyll *a* standing stock and oceanographic conditions under fast ice near Syowa Station, Antarctica, in 1983/84. Nankyoku Shiryô (Antarct. Rec.), **30**, 19–32.
- WATANABE, K. (1982): Centric diatom communities found in the Antarctic sea ice. Nankyoku Shiryô (Antarct. Rec.), **74**, 119–126.
- 渡辺研太郎 (1988): 昭和基地周辺におけるアイスアルジーの生態学的研究. 博士論文, 東京大学, 226 p.
- 渡辺研太郎 (1990): 沿岸海水域の一次生産. 月刊海洋, **22**, 588–596.
- 渡辺研太郎 (1996): アイスアルジー. 月刊海洋/号外, **10**, 25–29.
- WATANABE, K. (1988): Sub-ice microalgal strands in the Antarctic coastal fast ice area near Syowa Station. Jpn. J. Phycol., **36**, 221–229.
- WATANABE, K. and SATOH, H. (1987): Seasonal variations of ice algal standing crop near Syowa Station, East Antarctica, in 1983/84. Bull. Plankton Soc. Jpn., **34**, 143–164.
- WATANABE, K., SATOH, H. and HOSHIAI, T. (1990): Seasonal variation in ice algal assemblages in the fast ice near Syowa Station in 1983/84. Antarctic Ecosystem—Change and Conservation, ed. K. R. KERRY and G. HEMPEL. Heidelberg, Springer, 136–142.

(1998年7月24日受付; 1998年9月16日改訂稿受理)