

氏名(本籍)	こ 五 味 やす 泰 し 史
学位の種類	博 士 (農 学)
学位記番号	農 博 第 8 5 2 号
学位授与年月日	平 成 18 年 3 月 24 日
学位授与の要件	学位規則第 4 条第 1 項該当
研究科専攻	農学研究科応用生命科学専攻 (博士課程)
学位論文題目	Distribution of phytoplankton assemblage in the Southern Ocean with special reference to its contribution to the downward export of biogenic silica (南大洋における植物プランクトン群集の分布生態と生物起源珪素の下方輸送への寄与)
論文審査委員	(主 査) 教 授 谷 口 旭 (副 査) 教 授 谷 口 和 也 教 授 鳥 山 欽 哉 福 地 光 男(国立極地研究所副所長)

論文内容要旨

序論

南大洋は全球的な気候変動および物質循環に対して重要な役割を果たしていると考えられているが、海洋前線および海氷分布によって区分される海域により物質循環過程および生態系の構造や機能が異なることが知られている。さらに南大洋では環境の季節変動が非常に激しいため、それらの季節変動も大きい。したがって、南大洋における物質循環過程および生態系を詳細に解明するためには海域ごとの経時的な観測が必要であるが、地理的および気象上の困難さのために研究例は少なかった。海洋における物質循環および生態系の基盤となっている植物プランクトンについて人工衛星によっても観測が可能であるが、その群集構造や鉛直分布の解明には現場における観測が不可欠である。国立極地研究所が組織する日本南極地域観測隊は、昭和基地への往復航路上でモニタリング観測を継続的に行ってきた。さらに2001-2002年および2002-2003年には、南大洋東部インド洋区において複数の観測船によるタイムシリアルな観測が実施され、南大洋ではあまり例のない時系列サンプルの入手に成功した。本研究はそのサンプルを用いて、植物プランクトン群集の水平的、鉛直的ならびに経時的変動とその要因を解明すること、さらに全海洋の中でも南大洋でとりわけ大きいとされる生物起源珪素の下方輸送に対する珪藻種の寄与を解明することを目的とするものである。

夏季の南大洋インド洋区南極表層水域における珪藻群集の分布

南大洋は南極大陸を中心とした周極的な海洋構造を有することから、植物プランクトン群集の現存量および種組成の変動は緯度方向に大きく、経度方向に小さいと考えられている。そのため、植物プランクトン群集の分布に関して緯度方向の変動はよく調べられてきたが、経度方向の変動については調査例が少ない。そこで、極前線以南の海域の表層を占める南極表層水中の、主要な植物プランクトン分類群の一つである珪藻群集の細胞数密度および種組成の経度方向の変動を調査した。そのための試料を1999年の12月上旬から中旬 (Leg 1) および2000年の2月中旬から3月中旬 (Leg 2) にかけて極前線以南の39°E-150°Eの海域で表面から採集した (Fig. 1)。Leg 1では珪藻群集の細胞数密度は経度方向にほぼ均一であったが、種組成はモザイク的に大きく変動していた。一方、Leg 2では60°Eを境にして細胞数密度および種組成が経度方向に変化していた。クラスター分析の結果、珪藻群集はLeg 1では4クラスター、Leg 2では3クラスターに分けられた (Fig. 2, Table 1)。Leg 2では各クラスターの分布が比較的単純であったのに対し、Leg 1では各クラスターがモザイク状に分布していた。Leg 1の観測を行った12月は海氷の融解が活発な季節であり、Leg 1では各経度における氷縁の後退時期とクラスターの分布との間に関連性がみら

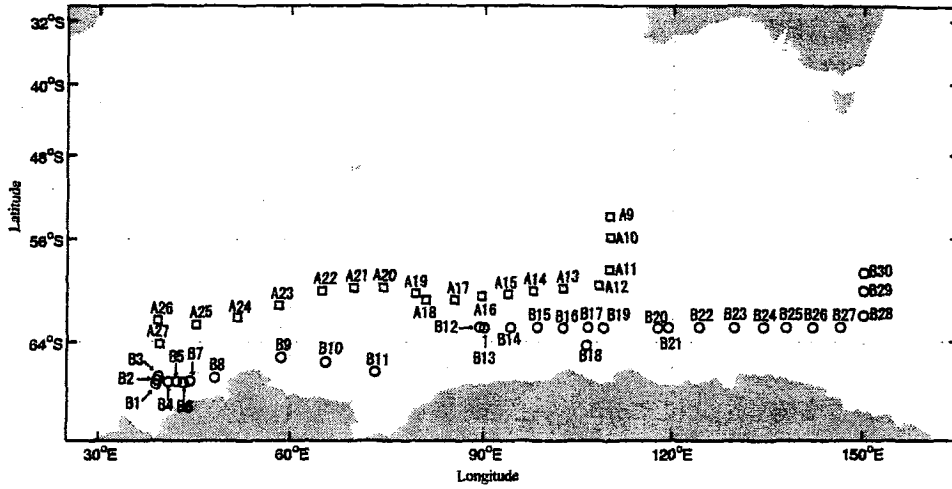


Fig. 1. Location of sampling stations. Stations A9-A27 (Leg 1: □) were occupied on the westward leg during the period from 8 to 17 December 1999, Stations B1-B30 (Leg 2: ○) on the eastward leg from 17 February to 13 March 2000.

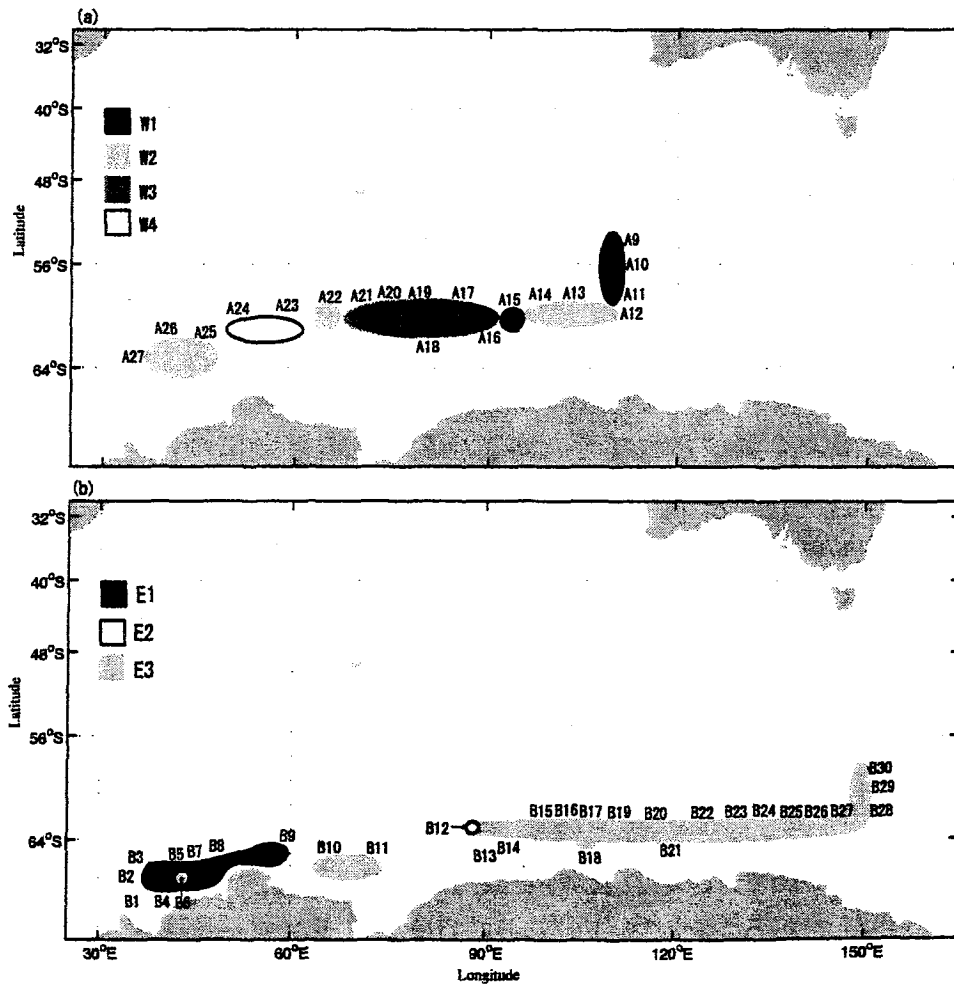


Fig. 2. Geographical distributions of the clusters on Leg 1 (a) and Leg 2 (b).

Table 1. Mean abundances of each cluster and dominant species/group ($\times 10^3$ cells/l) in each cluster derived by a cluster analysis for Leg 1 (a) and Leg 2 (b).

(a)

Cluster	W1	W2	W3	W4
Number of stations	4	7	6	2
Mean of total abundance	130.2	289.3	220.2	15.8
<i>Chaetoceros dichæta</i>	2.9	4.8	16.7	0.0
<i>Chaetoceros neglectus</i>	3.9	24.1	17.0	1.4
<i>Chaetoceros</i> sp. cf. <i>curvisetus</i>	5.7	9.4	18.6	0.0
<i>Chaetoceros</i> sp. cf. <i>dichæta</i>	2.4	31.4	50.9	1.0
<i>Corethron criophilum</i>	2.5	3.8	5.2	0.4
<i>Dactyliosolen tenuijunctus</i>	1.6	98.8	1.4	6.7
<i>Fragilariopsis kerguelensis</i>	7.7	4.6	2.0	0.0
<i>Fragilariopsis</i> spp.	25.0	14.5	13.5	0.7
<i>Pseudo-nitzschia</i> spp.	38.8	56.4	35.8	2.5

(b)

Cluster	E1	E2	E3
number of stations	8	1	21
mean total diatom abundance	528.1	610.1	108.9
<i>Chaetoceros dichæta</i>	2.3	56.6	1.9
<i>Chaetoceros neglectus</i>	1.2	0.0	0.1
<i>Chaetoceros</i> sp. cf. <i>curvisetus</i>	0.6	1.1	0.1
<i>Chaetoceros</i> sp. cf. <i>dichæta</i>	12.7	36.6	7.7
<i>Corethron criophilum</i>	3.5	28.4	4.4
<i>Dactyliosolen tenuijunctus</i>	321.2	0.1	10.8
<i>Fragilariopsis kerguelensis</i>	0.9	123.2	3.3
<i>Fragilariopsis</i> spp.	64.2	221.0	46.2
<i>Pseudo-nitzschia</i> spp.	60.3	105.4	8.3

れたことから、海水の動態が珪藻群集の経度方向の変動に影響していたと考えられた。

南大洋東部インド洋区の季節的氷水域における植物プランクトンブルームの形成と維持

南大洋の季節的氷水域では海水消失にともなう成層構造の発達、場合によっては海水内で生息する藻類（アイスアルジー）の寄与により植物プランクトンブルームが形成されると一般的には言われている。しかし、その実態が十分に解明されているとは言いがたい。そこで季節的氷水域において海水存在期から開水期をつうじて時系列観測を行ない、海水消失にともなう水柱の物理的構造の変化および植物プランクトン群集の変動を調べた。観測は 64°S, 140°E および 66°30'S, 140°E に設定した二測点で、2001 年 11 月から 2002 年 3 月にかけて実施した (Fig. 3)。64°S では 1 月、66°30'S では 2 月にそれぞれ海水が消失し、

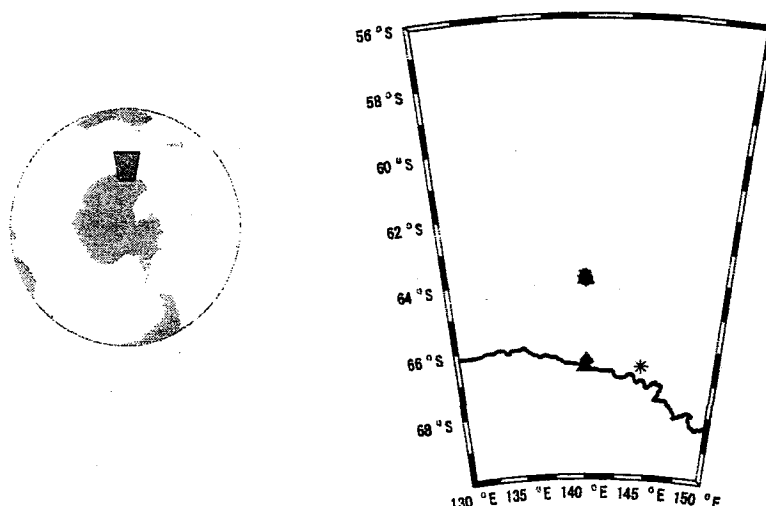


Fig. 3. Sampling stations in the seasonally ice-covered area in the eastern Indian Sector of the Southern Ocean occupied by four cruises conducted from November 2001 to March 2002. *: November, ■: December, ●: January, ▲: February, ◆: March.

その後ともに植物プランクトンブルームが形成されたが (Fig. 5)、水柱の物理構造および植物プランクトンの群集構造は測点間で異なっていた。すなわち、64°S では海水消失にともなって水柱の成層構造が発達したが (Fig. 4a)、66°30'S では成層構造の発達は観察されなかった (Fig. 4b)。また 64°S では水柱でアイスアルジーとみられる *Phaeocystis* spp. および *Pseudo-nitzschia prolongatoides* の急激な増加が確認されたが (Fig. 6a)、66°30'S では同様の現

象はみられなかった (Fig. 6b)。これらのことから、季節的氷域における植物プランクトンブルームは、従来言われてきたような融氷によって発達する成層下だけではなく、不安定な水柱構造下でも形成されることが明らかとなった。また、海氷の消失にともなって放出されたアイスアルジーが植物プランクトンの群集構造に影響を与えていたことが示唆された。棚氷に覆われた沿岸水域から遠く離れた外洋域においてこのような事実を時系列データで示しえたことは、本研究の大きな成果の一つである。

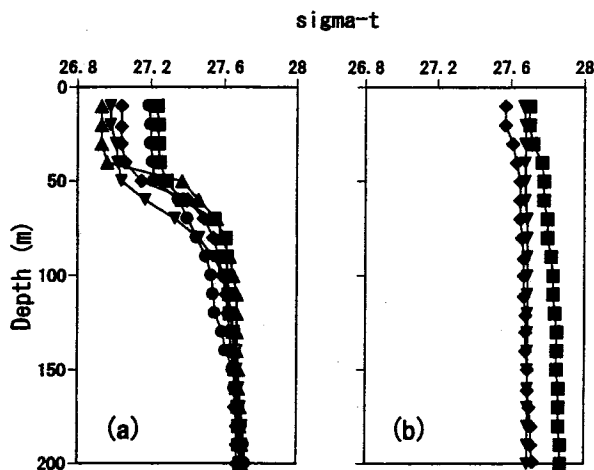


Fig. 4. Vertical profiles of $\sigma\text{-}t$ at 64°S , 140°E (a) and $66^{\circ}30'\text{S}$, 140°E (b) during the period from November 2001 to March 2002: November (■), December (●), January (▲), February (◆) and March (▼).

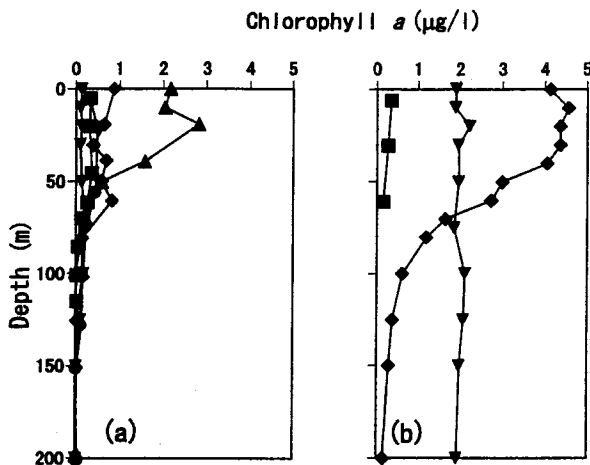


Fig. 5. Vertical profiles of chlorophyll a at 64°S , 140°E (a) and $66^{\circ}30'\text{S}$, 140°E (b) during the period from November 2001 to March 2002: November (■), December (●), January (▲), February (◆) and March (▼).

南大洋東部インド洋区の亜表層クロロフィル極大層における珪藻群集

亜表層クロロフィル極大 (Subsurface Chlorophyll Maximum: SCM) とは、植物プランクトンバイオマスの指標である Chlorophyll a が亜表層で極大を形成する鉛直分布様式のことである。SCM は熱帯から極域の南大洋までみられ、その形成要因は多岐にわたることが知られている。南大洋では亜表層における沈降の減速による珪藻の集積が SCM の形成と維持に重要な役割を果たしていることが示唆されているが、SCM に分布する珪藻群集の構造および珪藻の深さ

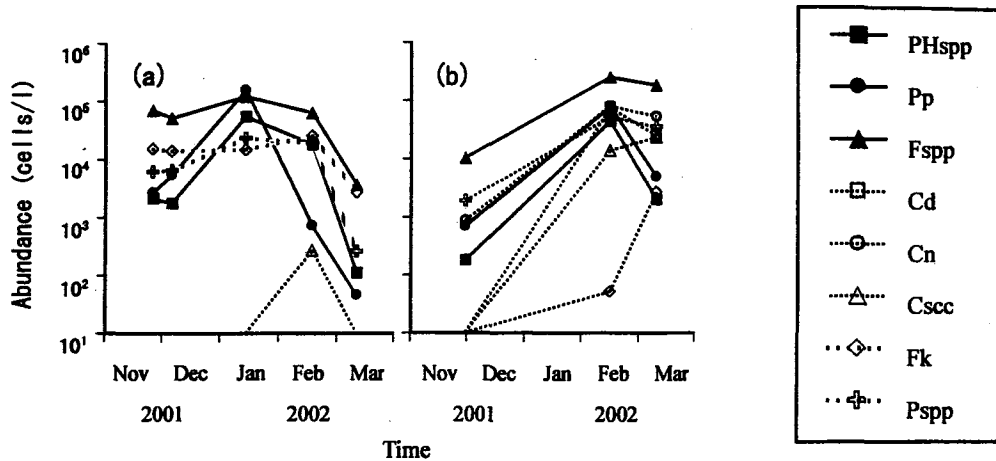


Fig. 6. Temporal variations in mean abundance of dominant species in the surface mixed layer at 64°S, 140°E (a) and 66°30'S, 140°E (b) during the period from November 2001 to March 2002: PHspp: *Phaeocystis* spp.; Pp: *Pseudo-nitzschia prolongatoides*; Fspp: *Fragilariopsis* spp.; Cd: *Chaetoceros dicheta*; Cn: *Chaetoceros neglectus*; Csc: *Chaetoceros* sp. cf. *curvisetus*; Fk: *Fragilariopsis kerguelensis*; Pspp: *Pseudo-nitzschia* spp. The first three filled symbols have been reported as typical ice algae.

による沈降速度の変化については明らかにされていない。そこで、まず2002年および2003年の観測でSCMが確認された11測点より採取された試料を用いて珪藻群集の種組成の鉛直変化を調べた (Fig. 7)。SCMはほぼ全ての測点で水温極小層の内部に形成されていた (Fig. 8)。SCMにおける珪藻群集のカーボンバイオマスは表層に比べて高い場合と低い場合があった (Fig. 9)。高い場合に

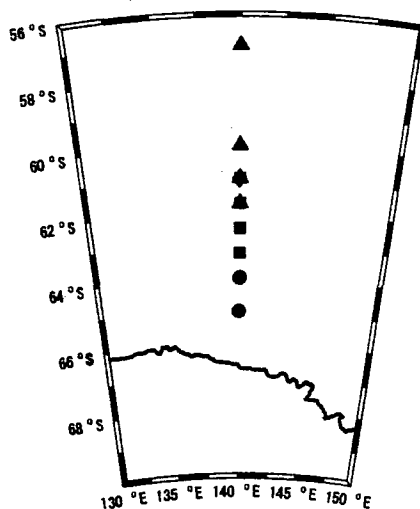


Fig. 7. Stations where subsurface chlorophyll maximum was observed in summer of 2002 and 2003. ▲: February 2002, ◆: March 2002, ■: March 2003, ●: February 2003.

は表層と SCM における種組成には大きな違いはなかったことから (Fig. 10b)、SCM の珪藻群集は表層から沈降してきたものと考えられた。すなわち、この場合には沈降した珪藻が水温極小層内に集積することが SCM の形成要因であるとみなされる。これを確認するために、2002 年および 2003 年にセディメントトラップ実験を行い、実際に沈降している珪藻群集を採集した (Fig. 11)。得られた沈降フラックスデータと水柱中の細胞数密度から沈降速度の鉛直差を算出

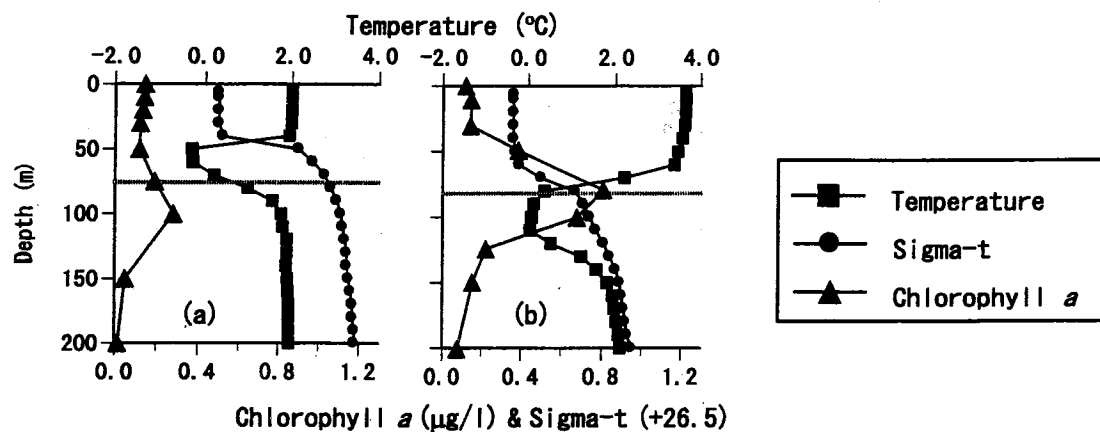


Fig. 8. Vertical profiles of temperature (■), sigma-t (●) and chlorophyll *a* (▲) at stations where SCM was observed at 64°S in February 2003 (a) and at 61°S in March 2003 (b). Dashed lines represent 1% photic depth.

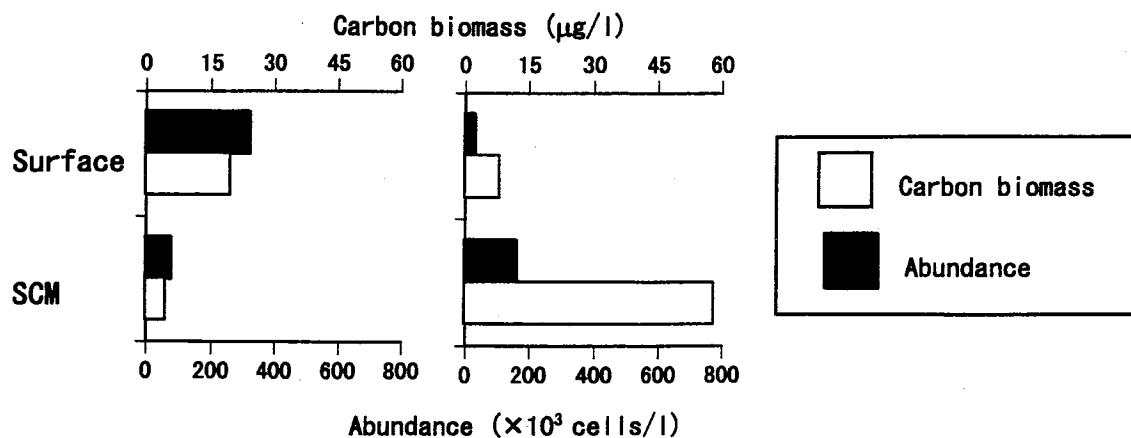


Fig. 9. Abundance and carbon biomass of the diatom populations in the surface layer and at SCM formed at 64°S in February 2003 (a) and 61°S in March 2003(b).

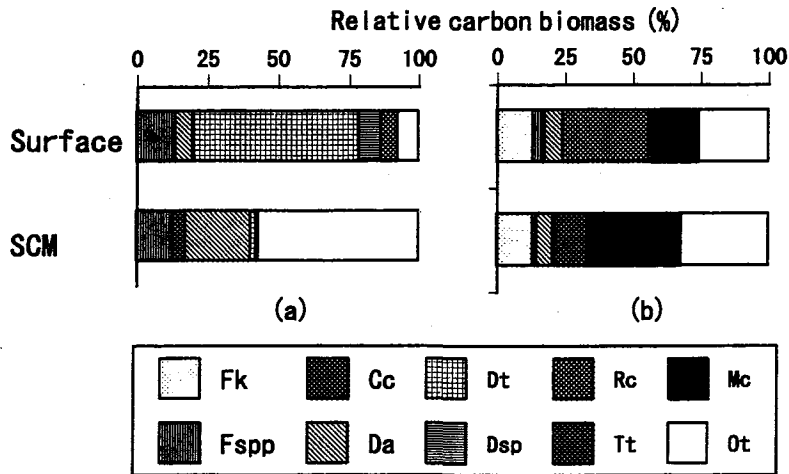


Fig. 10. Species composition of diatom population in carbon biomass (%) in the surface layer and at SCM formed at 64°S in February 2003 (a) and 61°S in March 2003 (b). Fk: *Fragilariopsis kerguelensis*; Fspp: *Fragilariopsis* spp.; Cc: *Corethron criophilum*; Da: *Dactyliosolen antarcticus*; Dt: *Dactyliosolen tenuijunctus*; Dsp: *Dactyliosolen* sp.; Rc: *Rhizosolenia chunii*; Tt: *Thalassiosira tumida*; Mc: *Membraneis challengeri*; Ot: Other diatoms.

すると、沈降速度が水温極小層で低下していたことがわかる (Fig. 12)。以上のことは、南大洋南部海域では水温極小層が浅い深度に形成されるため光合成生活をする植物プランクトンにとって有利な場になっていることが、この海域全体に亘って SCM が形成される一義的な要因になっていることを示唆している。この特性は有光層よりもはるかに深い深度に形成される北太平洋亜寒帯海域における水温極小層のそれとは異なっているといえる。

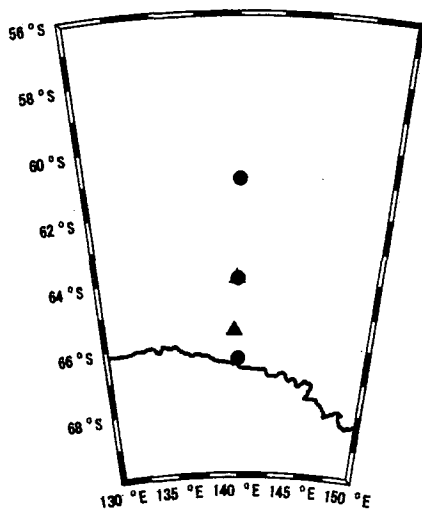


Fig. 11. Stations where floating sediment trap experiments were conducted in February 2002 (●) and February-March 2003 (▲).

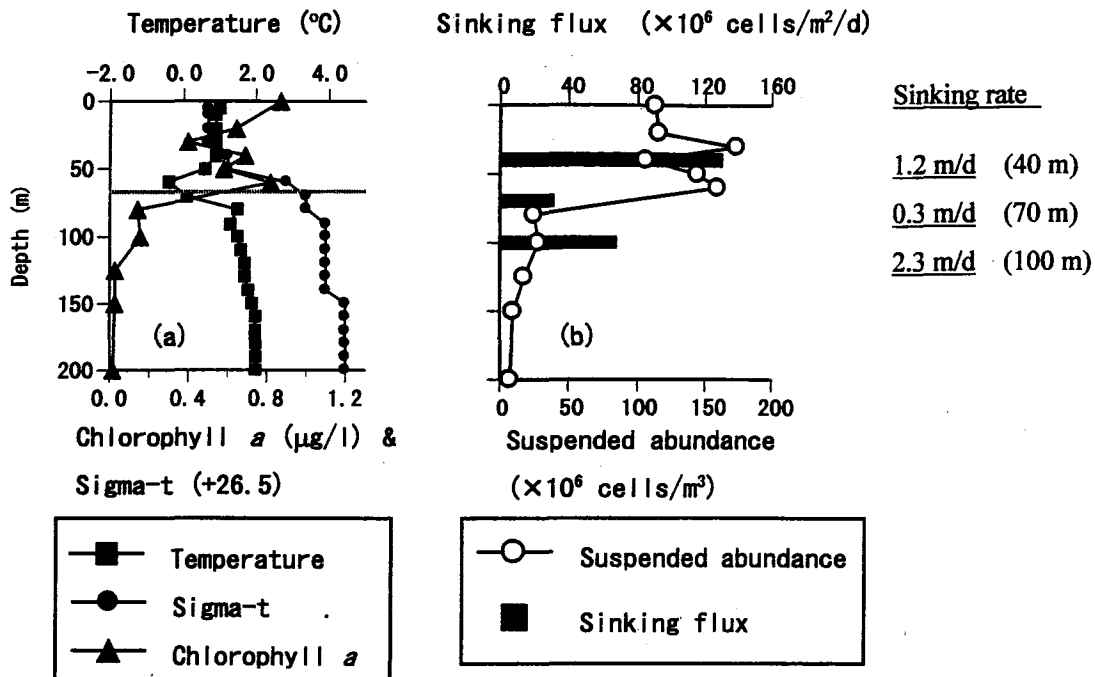


Fig. 12. Vertical profiles of temperature, sigma-t, chlorophyll *a* (a), and of diatom population in abundance and their sinking flux (b) at 64°S, 140°E in February 2002. Calculated sinking rate at each depth is shown on the right of (b). Dashed line in (a) represents 1% photic depth.

南大洋東部インド洋区周年開水域における珪質植物プランクトン群集と生物起源珪素の下方輸送への寄与

極前線以南で周年海氷が存在しない海域は周年開水域とよばれるが、この海域における生物起源珪素の堆積速度は全海洋の中でも最も高いといわれている。それには珪藻種 *Fragilariopsis kerguelensis* が大きく貢献していることが知られているが、*F. kerguelensis* のいかなる特性が堆積に貢献するのかわかっていない。そこで本研究では *F. kerguelensis* の生産力ないし卓越度を明らかにするために、周年開水域における珪質植物プランクトン群集全体の細胞数密度とその中に占める本種の卓越度をおよび種組成を 61°S, 140°E おいて 2001 年 11 月から 2002 年 3 月までの間調査した (Fig. 13)。また、セディメントトラップ実験により、さまざまな条件下における本種および他の優占種の沈降速度を求めた。その結果、予想に反して表層における *F. kerguelensis* の優占度は群集全体の細胞数密度が高い観測期間の前半に高くなり、生産期をつうじた優占度はわずか 5.6% にすぎないことが明らかになった (Figs. 14 and 15)。この値は海底堆積物中の群集に占める優占度 > 50% に比べて非常に小さい。このことは *F. kerguelensis* の沈降中の減耗が低いこと、あるいはその沈降速度が速いことに

よると考えられるが、事実本研究では本種の沈降速度が他種に比べて明らかに高いことが確認できた (Fig. 16)。本種の特異的に大きな沈降速度が原因となって沈降中の減耗が少なくなり、その結果海底への堆積速度が大きくなっているものと判断された。このようなことを明らかにしえたのは本研究の成果の一つではあるが、何故本種の沈降速度が特異的に高いのかは、将来の課題として残される。

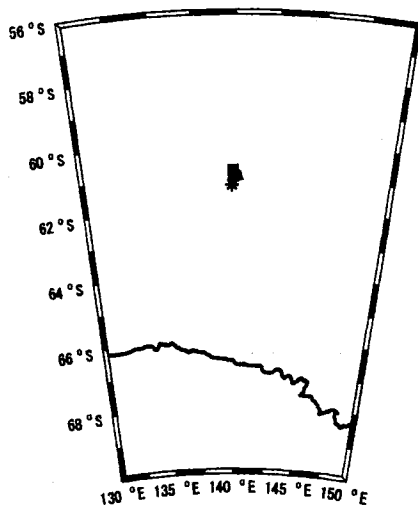


Fig. 13. Sampling stations in permanently ice-free area in the eastern Indian Sector of the Southern Ocean occupied by four cruises conducted from November 2001 to March 2002. *: November, ■: December, ●: January, ▲: February, ◆: March.

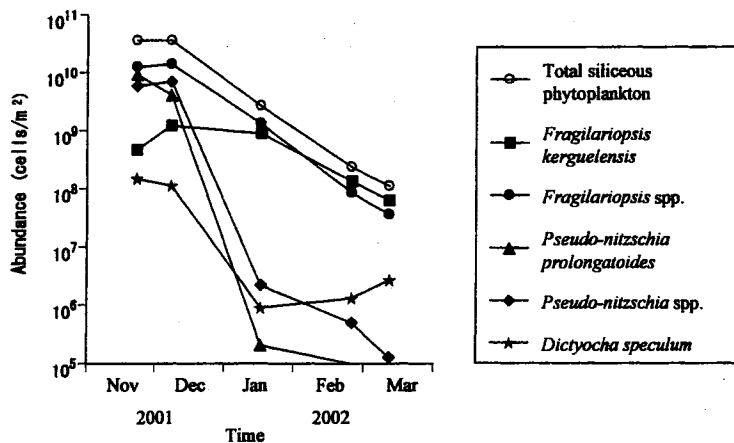


Fig. 14. Temporal variations of total and dominant species of siliceous phytoplankton in terms of integrated abundance through the surface mixed layer throughout the observation period from November 2001 to March 2002: Total siliceous phytoplankton (○), *Fragilariopsis kerguelensis* (■), *Fragilariopsis* spp. (●), *Pseudo-nitzschia prolongatoides* (▲), *Pseudonitzschia* spp. (◆) and *Dictyocha speculum* (★).

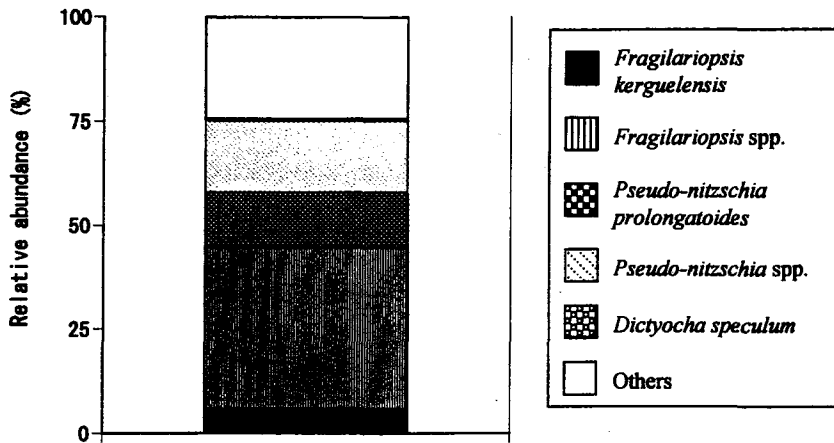


Fig. 15. Species composition of siliceous phytoplankton assemblage in terms of integrated abundance throughout the surface mixed layer throughout the observation period from November 2001 to March 2002.

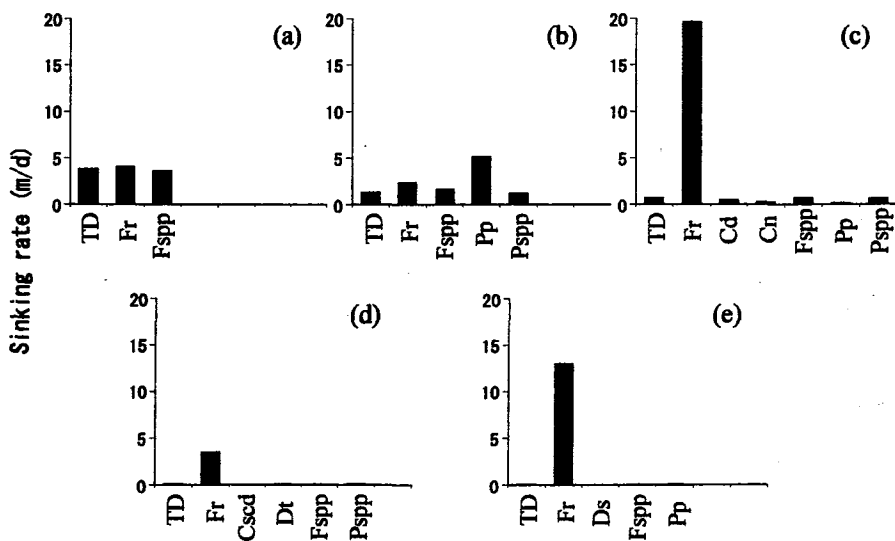


Fig. 16. Sinking rates of diatoms estimated by sediment trap experiments at 61°S (a), 64°S (b) and 66°30'S in February 2002 and at 64°S (d) and 65°30'S (e) in February-March 2003 on a longitudinal line along 140°E. TD: Total Diatoms; Fr: *Fragilariopsis kerguelensis*; Cd: *Chaetoceros dictyota*; Cn: *Chaetoceros neglectus*; Cscd: *Chaetoceros* sp. cf. *dictyota*; Ds: *Dactyliosolen* sp.; Dt: *Dactyliosolen tenuijunctus*; Fsp: *Fragilariopsis* spp.; Pp: *Pseudo-nitzschia prolongatoides*; Pspp: *Pseudo-nitzschia* spp.

論文審査結果要旨

南大洋は地球環境の形成と維持に深く関わっているが、その機序の大きな部分を植物プランクトン群集の活動に負っている。極域における植物プランクトン群集の現存量と活動は季節的に激しく変動するが、極域ゆえにその解明は困難であり、研究例は少なかった。本研究は、南大洋インド洋区における時系列観測で得られたサンプルを解析し、植物プランクトン群集の地理的、鉛直的ならびに経時的変動とその要因を解明し、さらに優占珪藻種の沈降堆積特性を明らかにしたものである。

まず、極前線以南の海域で経度にそって珪藻群集を経時的に調査した結果、海氷の融解時には群集の種組成がモザイク的に大きく変動することが明らかになった。次いで、季節的・海氷域において、海氷被覆期から開水期を通じて時系列観測を行い、海氷消失にともなう水柱の物理的構造の変化および植物プランクトン群集の変動を調べた。その結果、本海域における植物プランクトンブルームは、従来言われてきたような融氷による水柱成層化だけではなく、海氷被覆による水柱の擾乱抑止によっても形成されることが明らかとなった。

本研究海域では広汎に亜表層クロフィル極大 (SCM) が観察されたが、多くの場合、その種組成は表層群集と共通していた。このことから、表層から沈降してきた珪藻類が発達した水温極小層に集積して SCM を形成したものと推察された。また、珪藻のうち *Fragilariopsis kerguelensis* は特異な沈降堆積様式を示す種であることが、本研究で初めて確認された。本種が海底堆積物中では 50% 以上を占めることは以前から知られていたが、本研究はプランクトン群集中での優占度がわずかに 5.6% に過ぎないこと、しかし特異的に速く沈降するために、沈降量が多くなるとともに沈降中の減耗が小さくなることを明らかにした。

以上の成果は、希な時系列観測によって得られた貴重な試料を丁寧に解析して得られたものであり、将来の南大洋植物プランクトン群集の動態研究および地球古環境の復元研究に大きく貢献するものと期待される。よって審査委員一同は博士 (農学) の学位授与に値するものと判断した。