

Fig. 19 Relationship of (a) integrated (0-12 m) production rates and mass fluxes and (b) integrated (0-12 m) production rates and organic carbon fluxes in the CEE of 1986.

Table 8 Mass fluxes, organic carbon contents, C/N ratios and fatty acid fluxes of sinking particles collected from the bottom of the CEE in 1986

Day	1-4	4-8	8-10	10-13	13-16	16-20	20-23
Mass flux (g/m ² day)	0.479	4.62	8.29	8.19	4.56	1.73	1.67
Organic carbon flux (g/m ² day)	4.69 X 10 ⁻²	0.647	2.33	2.37	0.820	0.431	0.391
organic content (%)	10.2	14.6	29.3	30.2	28.1	25.9	24.4
C/N ratio	7.73	7.68	6.34	6.25	6.54	6.82	6.26
Total fatty acids flux (mg/m ² day)	1.76	83.5	353	90.5	31.5	17.9	---
Fatty acids / POC (%)	3.77	12.9	15.1	4.35	3.84	4.14	---

---: not measured

3.3 メソコズム底部に沈降した粒子の脂肪酸組成

脂肪酸は炭素数12から24のものが検出された (Table 9)。主な脂肪酸は、全試料で、14:0、16:0、16:1 が多く、全脂肪酸量の 55-74 %を占めた。18:1、20:3、20:5は、実験中に最も組成比の変化した脂肪酸であった。20:5は、4-8日目、8-10日目で組成比が高かったが、それ以後は低かった。一方で、20:3は、実験の後半に組成比が増加した。全飽和脂肪酸 (SAFA) は、1-4日目で割合が高く、全多不飽和脂肪酸 (MUFA) は、4-8日目、8-10日目で多かった。全一不飽和脂肪酸 (PUFA) は、実験中、組成比はほとんど変わらなかった。全分枝脂肪酸 (BrFA) は、実験の最後に5%を越える増加が見られた。

4. 考察

4.1 植物プランクトンブルームと粒子の沈降

水塊中のクロロフィル *a* 濃度の最大となる日付は、3層で深度の増加にともない、2日づつずれている (Fig. 16a)。4-8 m、8-12 mでの光合成生産は、0-4 mに比べ大きくなかったことから、0-4 m の植物プランクトン粒子が、下層へ沈降していると思われる。その粒子の沈降速度は、約 2 m/dayと計算される。これは、海洋で観測されるマリンスノーの沈降粒子の沈降速度 (50 m/day 以上、Shank and Trent, 1980) よりはるかに小さく、プランクトンの自重沈降であると判断される。

水塊中のクロロフィル *a* の極大値及び有機物生産速度の最大値は、4日目から8日目にかけてみられたことから、これらの期間が植物プランクトンブルームの増殖期にあたる。メソコズムの底部に堆積した粒子では、4日目から16日目にかけて粒子フラックスが大きかった。水塊中の生物生産と底部に到達する粒子の間には時間差がある。そこで、その時間差を4日と仮定し、水塊中の生産速度と堆積した粒子フラックスとの相関をとったところ (Fig. 19)、良い相関関係が得られた。厳密に言えば、沈降する粒子には、粒子の大きさ、形態から、様々な沈降速度が存在する。そのため、大きなフラックスが4日目から16日目にかけて広がったと思われるが、主な粒子は、水塊の生産後、4日程度の時間差で沈降しているものと判断された。これによると、1-4日目のフラックスは、メソコズムのバックグラウンドの粒子とい

Table 9 Fatty acid composition of sinking particles collected from the bottom of the CEE in 1986

Day	1-4	4-8	8-10	10-13	13-16	16-20
Saturated						
C12:0	1.59	0.22	0.25	0.30	0.34	0.60
C13:0	0.12	0.05	0.09	0.11	0.11	0.20
C14:0	24.10	17.20	18.93	18.30	13.03	12.92
C15:0	1.26	0.76	1.19	1.64	1.79	1.30
C16:0	28.06	21.86	23.83	29.15	28.25	29.04
C17:0	0.82	0.82	0.93	0.54	0.42	0.67
C18:0	2.54	1.06	0.66	1.42	2.24	2.43
C20:0	0.26	0.24	0.31	0.23	0.41	0.54
C22:0	0.15	0.28	0.19	0.30	0.46	0.34
C24:0	0.09	0.27	0.18	0.16	0.15	0.14
Monounsaturated						
C14:1	0.11	0.11	0.10	0.13	0.16	0.18
C16:1	21.93	16.86	21.96	16.10	15.04	13.50
C18:1 (n-7,9)	5.77	3.28	4.23	8.18	10.52	6.98
C20:1	0.18	0.28	0.10	0.23	0.30	0.02
Polyunsaturated						
C16:2	1.65	2.41	2.34	1.68	1.61	1.64
C16:3	0.19	2.59	2.40	0.43	0.60	1.04
C16:4	0.19	0.66	1.06	0.41	0.72	0.23
C18:2	0.16	0.79	0.90	0.97	0.67	0.82
C18:3 (n-6)	0.12	0.43	0.27	0.26	0.32	0.34
C18:3 (n-3)	0.10	0.19	0.14	0.12	0.17	0.13
C18:4	0.21	0.79	1.05	0.17	0.37	0.49
C20:3	0.51	0.31	2.28	6.56	5.53	7.10
C20:5	0.52	20.71	10.33	2.09	3.37	4.50
C22:4	0.41	0.33	1.17	1.56	0.96	1.87
C22:6	0.54	3.42	2.29	1.41	2.20	2.73
Branched						
C15:0 iso	0.67	0.14	0.34	0.97	1.59	1.60
C15:0 anteiso	1.37	0.61	0.65	1.25	1.72	1.64
C17:0 iso	0.31	0.37	0.11	0.64	0.29	0.50
C17:0 anteiso	1.27	0.57	0.81	1.10	1.47	1.67
SAFA total	63.86	45.25	47.53	55.81	52.49	52.65
MUFA total	28.01	20.57	26.43	24.68	26.07	21.17
PUFA total	4.50	32.49	24.13	15.54	16.36	20.77
BrFA total	3.62	1.69	1.91	3.97	5.08	5.42
Total	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00

(expressed as % total fatty acids)

うことになる。

4.2 脂肪酸フラックスと組成変動

沈降した粒子の脂肪酸の有機炭素に対する比は、4・8日目と8・10日目に高く (Table 9)、植物プランクトンの増殖と脂肪酸の積極的な生成が示唆される。しかし、第2章での懸濁粒子脂肪酸の生成や、Morris et al. (1985)で報告されるように、脂肪酸の生成は植物プランクトンの増殖に遅れて生成することが多い。第2章の結果から、脂肪酸の生成には、膜成分と貯蔵性成分のものがああり、脂肪酸の生成が植物プランクトンの増殖にともなうのは、膜成分の生成、増殖に遅れるのは貯蔵性脂質の生成と考えられる。

脂肪酸の組成は、粒子がケイ藻類に由来していることを示している。脂肪酸の 14:0、16:0、16:1、20:5は、全脂肪酸の 61.9-75.9 %で、Chuecas and Riley, (1969) と Volkman et al. (1989)が報告する *Chaetoceros* spp.の脂肪酸組成に近い。微少渦鞭毛藻類 (nanoflagellates) は、Gymnodiniumなどが考えられる。これらの脂肪酸には、14:0、16:0、18:1、22:6が多く見られる (Cobelas and Lechado, 1989; Kayama et al., 1989)。分析試料中の脂肪酸組成において、ケイ藻類には少ない18:1、22:6が少量であることから、微少渦鞭毛藻類の沈降粒子に対する寄与は小さいだろう。メソコズム実験後半の18:1の増加は、この微少渦鞭毛藻類か、この時期に増加した羽状目ケイ藻類 *Nitzschia* によると思われる。

4.3 時間変動に見られる脂肪酸の特徴

4.3.1 20:5脂肪酸

20:5は、4-8日目で急激な増加が確認された。炭素数20以上の多不飽和脂肪酸のグラフを Fig. 20に示す。ケイ藻類には、20:5が多く含まれる (Ackman, 1968; Kayama et al., 1989)。また、動物プランクトンには、20:5のほか多不飽和脂肪酸が多く含まれることが知られる (Ackman, 1989)。試料中の20:5は、ケイ藻類に由来し、同時に動物プランクトンには由来していない。何故なら、動物プランクトンが粒子中に大きな影響を与えているとしたら、22:6も20:5と同じように変動するは

ずである。しかし実験期間中に、試料中の22:6は微量であることから、20:5はケイ藻類が主に由来していると考えてよい。

ここでは、20:5はケイ藻類が活発な成長をする際に、生理的に多く生成されていると考えられる。これまで多くの研究者によって、ケイ藻の成長にともない、20:5の高い生成があることが報告されている (Ackman et al., 1964; Kate and Volcani, 1966; Mortensen et al., 1988)。栄養塩、温度などの環境要因による生成の増大の他、成長ステージでの違い (Arao et al., 1987)、成長速度による違い (Morris et al., 1985) も報告されている。本研究では、植物プランクトンブルームの増殖時にあたる粒子に高濃度の20:5が見られ、植物プランクトンブルームの後半には濃度は減少した。一方で、20:5の減少と同時に、20:3の増加が見られた。

Cohen et al. (1988) は、紅藻類の培養実験で、20:5に関して、興味深い知見を得ている。彼らは、光、温度、塩分、pHの培養条件を変えて、紅藻類 *Porphyridium* の培養を行ったところ、紅藻類の生長に対して環境条件がよいときには、20:5が多く生成されるのに対し、環境条件が悪いときには、20:4が多く生成されることを見いだした。

このことから推測するに、本研究の観測結果も同じ現象を示していると考えられる。ケイ藻類の増殖によって、20:5が多く生成されたのに対して、ブルームの衰退期には、栄養塩が枯渇し、20:3が多く生成されたとみなすことができる。すなわち、20:5と20:3の変動は、ケイ藻類ブルームにおける脂肪酸のプランクトン生理の変化によるものである。

4.3.2 不飽和脂肪酸／飽和脂肪酸比

飽和脂肪酸に対する各種不飽和脂肪酸の比は、特徴的である (Fig. 21)。この比が高い4-8日目、8-10日目の粒子は、水塊中での生物生産が活発で合ったときにあたる。Chuecus and Riley (1969) は、栄養塩が豊富な培養では、植物プランクトンの生長は活発で、多不飽和脂肪酸を中心に、不飽和脂肪酸が多く生成されるのに対し、栄養塩制限下では、飽和脂肪酸の生成が増えるとしている。Pohl and Zurheide (1979) は、脂肪酸を用いたプランクトン成長期の指標として、 $(20:3+20:4+20:5) / (14:0+16:0+16:1+18:0+18:1)$ を提唱している。ただし、ケイ藻類では、16:1は、増

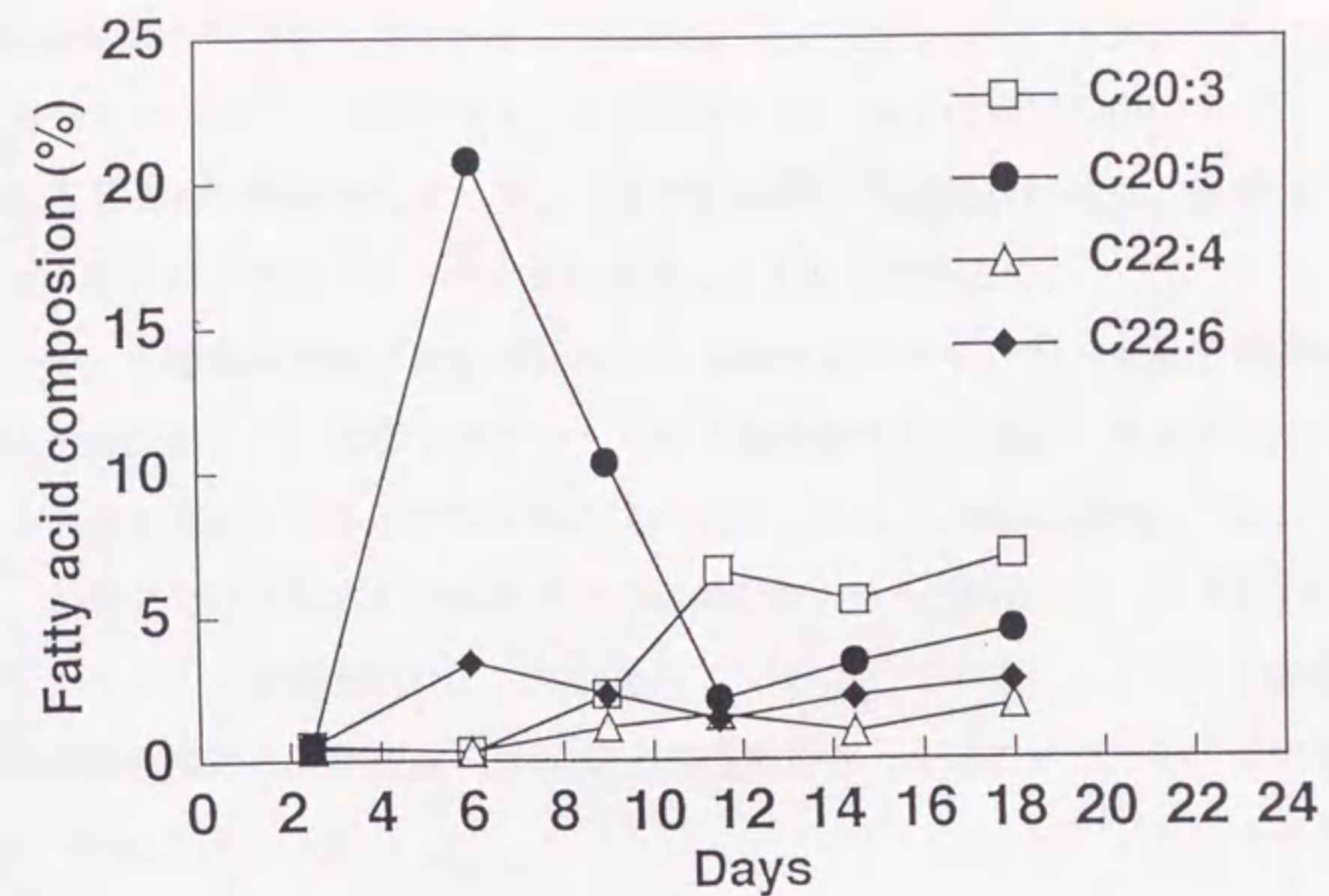


Fig. 20 Changes in percentage composition of 20 carbon number PUFA of sinking particles in the CEE of 1986.

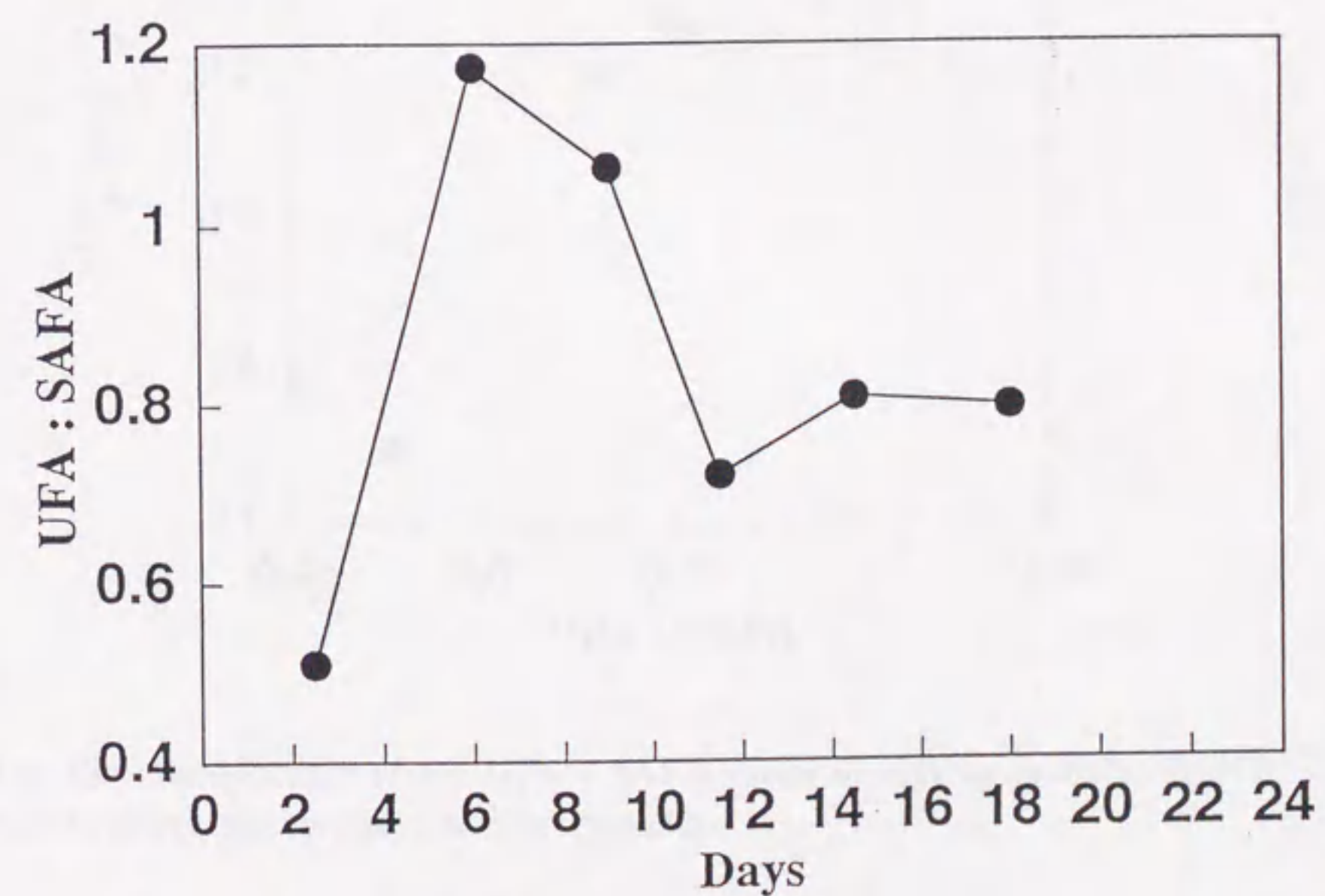


Fig. 21 Changes in the UFA / SAFA ratios in sinking particles during the experiment.

殖期に組成比が増加する傾向がある (Kattner and Brockmann, 1990) ため、分母に入れるべきではない。本研究でも、8-10日目には、16:1は増加傾向にあった。本研究の結果と過去の報告例によって、不飽和脂肪酸/飽和脂肪酸比は、植物プランクトンブルームのプランクトンの生長活性を示すものと判断した。

そして、不飽和脂肪酸/飽和脂肪酸比の指標性について、別の生長活性指標との相関性から試験した。植物プランクトンの有機炭素の $\delta^{13}\text{C}$ 値は、光合成の活性化にともない値が高くなることが知られる (O'leary, 1981)。Nakatsuka et al. (1992) によると、本研究で用いられた沈降試料中の有機炭素の $\delta^{13}\text{C}$ 値は、メソコズム内の植物プランクトンの光合成活性によって決まっているとしている。そこで、不飽和脂肪酸/飽和脂肪酸比と有機炭素の $\delta^{13}\text{C}$ 値との相関をとって見たところが、よい相関があった (Fig. 22)。

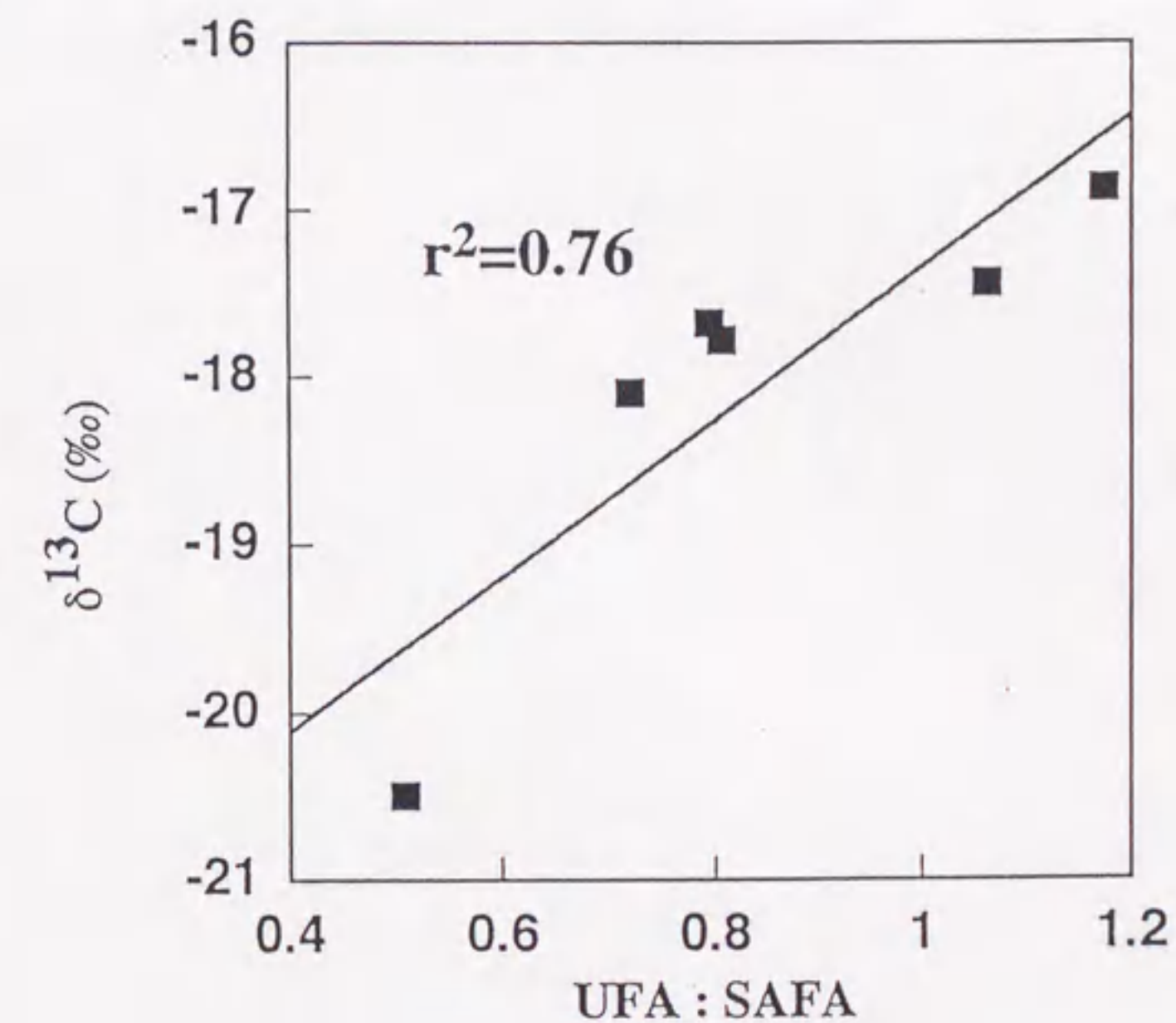


Fig 22 Relationship of the UFA / SAFA ratios in sinking particles with $\delta^{13}\text{C}$ values of organic carbon in sinking particles.

5. まとめ

メソコズムの底に沈降する粒子について、脂肪酸組成からは、メソコズム内にはその他の植物プランクトンも存在したけれども、ケイ藻類に由来することが明らかとなった。メソコズムの底に沈降した粒子は、主にケイ藻類の自重沈降で沈降するものであり、外洋の深層で観測される沈降粒子とは異なる。しかし、プランクトンブルームにともなって形成される沈降粒子は、それらのものが凝集して、巨大粒子(マリンスノー)となることが考えられる。

そして、それらの粒子には、ケイ藻類のプランクトンブルームの成長ステージの推移にともなう脂肪酸の組成変化が見られた。沈降する粒子は、ケイ藻類が中心となるため、脂肪酸にはプランクトンの群集組成の変遷は反映されにくい。20:5や不飽和脂肪酸/飽和脂肪酸比は、そうしたケイ藻類を中心としたブルームにおいてプランクトンの生理を示す指標となる可能性がある。

第4章 植物プランクトンブルームにともなう沈降粒子中の 脂肪酸の時系列変化

1. はじめに

南極周辺の海水圏においては、1年に1度、解氷期にケイ藻類やプリムネシオ藻類の大きな植物プランクトンブルームが起こることが知られている (Knox, 1990)。このブルームによって、大きな沈降粒子フラックスが形成され、それは南極海の年間フラックスの大部分を占めるものに相当する (Wefer et al., 1988)。また、この沈降粒子有機物は、底生生物及び氷に閉ざされる冬期の海中の生物のエネルギー源として重要である (Matsuda et al., 1990)。しかし、その有機物の化学組成について、詳細な検討は数少ない (Liebezeit, 1985; Liebezeit and Bodungen, 1987)。この期間のはっきりしたブルームは、観測を行いやすい。よって、この南極海の春ブルーム期にセジメントトラップを係留し、植物プランクトンブルームにともなう沈降粒子中の脂肪酸について分析を行った。

本章の目的は、ケイ藻類のプランクトンブルームにともなう沈降粒子有機物の評価であり、1) ブルームにともなう沈降粒子有機物のフラックスとその起源の推定、2) ブルームの推移による有機物の変質を明らかにすることである。

2. 試料の採集と分析方法

2.1 セジメントトラップ実験

南極沿岸域におけるセジメントトラップ実験は、観測船「しらせ」による第27次日本南極地域観測隊の観測の際、昭和基地の西方のクイーンモウドランドのブライド湾 (東経24°18'、南緯70°11'、水深300 m、Fig. 23) の111m深に時系列型セジメントトラップ (日油技研製、特注) に設置した。観測は、1985年12月28日から1986年2月8日にわたって実施し、3.5日毎に試料を採集した。実験期間中合計に12個の試料を得た。得られた沈降粒子試料は、遠心分離で水を除去した後で、-20℃で冷凍保存をした。

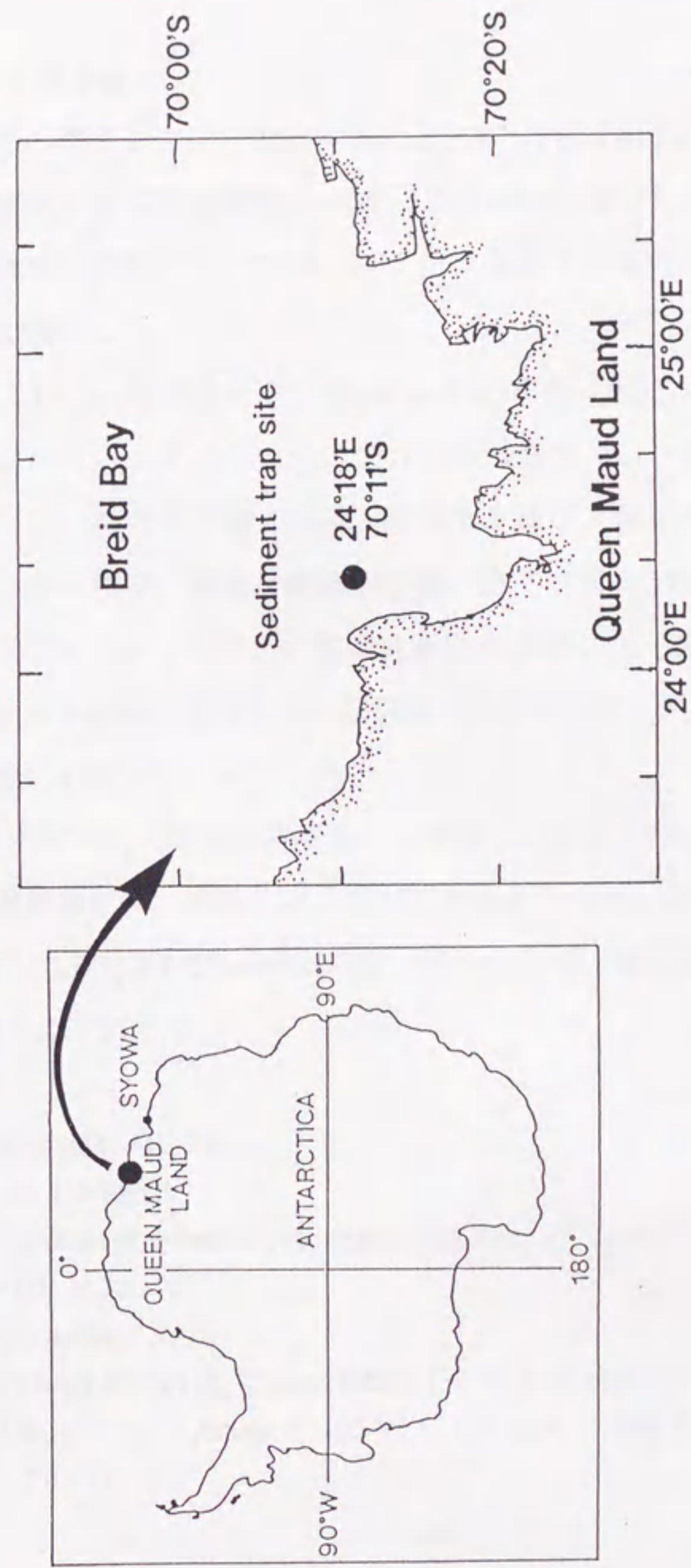


Fig. 23 Location of the time-series sediment trap in Breid Bay, Antarctica.

沈降粒子の有機炭素は、Handa et al. (1992)によって、測定されたものを用いた。

2.2 脂肪酸の分析方法

分析方法操作の概要をフローチャートにまとめ、Fig. 24に示す。

使用した溶媒はすべて蒸留精製し、GCにより汚染の無いことを確認した。実験器具及び分析操作中の汚染については、ブランク実験を行ない、汚染が無視できる範囲であることを確認した。

試料の一部 (300 mg湿重量) を、Bligh and Dyer法 (Bligh and Dyer, 1959) に基づき、クロロホルム/メタノール (2:1, V/V) を加えて、スターラーを用いて一晩攪拌して行なった。得られた抽出液は、蒸留水を加え、振とうした後、水相を分離した。クロロホルム相は、脱水、濃縮乾固後、*n*-ヘキサンに溶解、シリカゲルカラムクロマトグラフィーによって、炭化水素画分を分離した (生田, 1991)。残りの画分をメタノール溶媒に置換して、脂肪酸分析に用いた。以下の脂肪酸の分析は、第2章の脂肪酸の分析方法に同じである。

GCは、装置にGC-9A (島津製作所製) を使用した。注入口には、ソルベントカットシステム、検出器には、水素イオン検出器を備えている。カラムは、キャピラリーカラムで、FFS-ULBONHR-Thermo3000B (信和化工製、脂肪酸分析用) を使用した。GC分析の条件を以下に示す。

Instrument: Shimadzu GC-9A
Carrier gas: N₂, 0.6 kg/cm²
Injector: Solvent cut system (moving needle method), at 250 °C
Detector: FID, at 250 °C
Chromatopac: Shimadzu CR-4A
Column: FFS-ULBON HR-Thermo3000B (30 m, 0.25 mm i.d.)
Programmed: 130 °C — (2 °C/min) — 180 °C — (15 min) — 180 °C — (2 °C/min) — 210 °C

GC-MSにより脂肪酸エステルの同定と確認を行なった。使用したは、JEOL JMS-DX302 GCG 質量分析計 (日本電子製) であり、EI法とCI法の二つの方法を用いた。GC-MSの条件は、キャリアーガスにヘリウムを用いたことを除いて、すべて上述の

Sinking particles (wet samples)

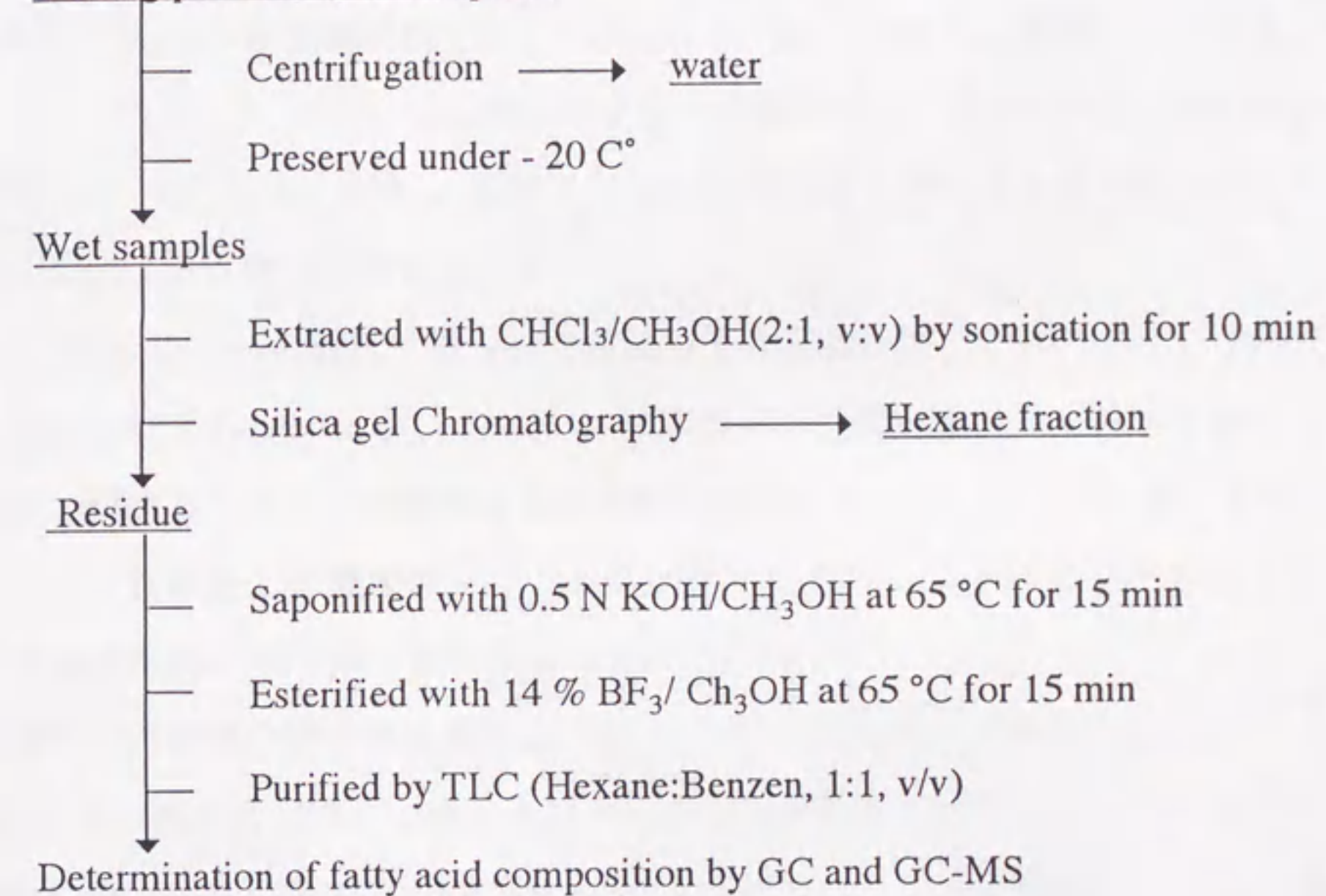


Fig. 24 Analytical procedure of fatty acids of sinking particles collected by sediment traps

GC分析の条件と同じに設定した。

3. 結果

3.1 沈降粒子フラックス

沈降粒子試料の顕微鏡観察では (Fukuchi et al., 1988)、動物プランクトンの糞粒 (フェーカルペレット) は非常に少なく、全試料でケイ藻 *Thalassiosira antarctica* が卓越していた (Fig. 25)。よって、この観測により得られた沈降粒子は、ケイ藻ブルームによる沈降粒子である。

Fig. 26には、この観測で得られた沈降粒子の有機炭素とクロロフィル a のフラックスを示した (Handa et al., 1992)。沈降粒子の有機炭素とクロロフィル a フラックスは、観測のトラップの開始から時系列に増加が見られ、サンプルNo. 5で頂点に達した。これ以後、有機炭素フラックスは徐々に減少し、クロロフィル a フラックスはサンプルNo. 7まで高い値を示した後減少した。

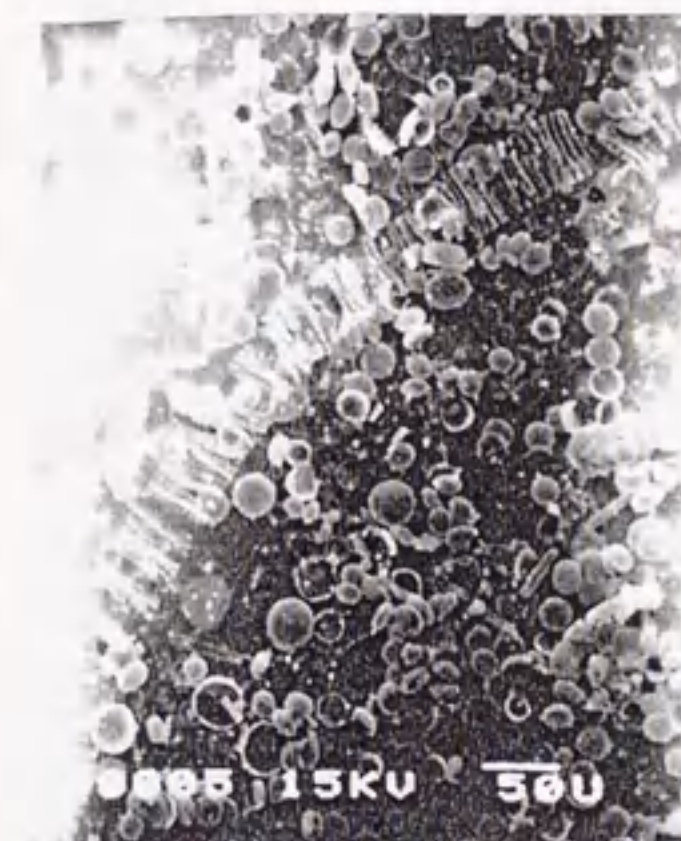
沈降粒子の有機炭素フラックスは、最大 $116 \text{ mgCm}^{-2}\text{d}^{-1}$ であった。Wefer et al. (1988) は、南極沿岸域のブランスフィールド海峡で1年間のセジメントトラップの係留を行い、1月に最大の $100 \text{ mgCm}^{-2}\text{d}^{-1}$ 以上のフラックスを観測している。本研究での沈降粒子フラックスは、それに比べて同等の大きなフラックスである。このことから、このトラップ実験が、南極沿岸域における植物プランクトンブルームにともなう沈降粒子を捉えていることがわかる。また、有機炭素フラックスの増減は、海洋表層の植物プランクトンブルームの成長と衰退に対応しているものと考えられる。

3.2 沈降粒子の脂肪酸組成

南極海沈降粒子の脂肪酸は、炭素数13以上のものについて分析を行ない、炭素数26までの脂肪酸が検出された。Fig. 27に沈降粒子の全脂肪酸フラックスを、Fig. 28には、試料中の代表的な脂肪酸の組成を示した。全脂肪酸フラックスにも有機炭素フラックスと同じ変動が見られ、脂肪酸の変動はブルームの変動に対応していた。

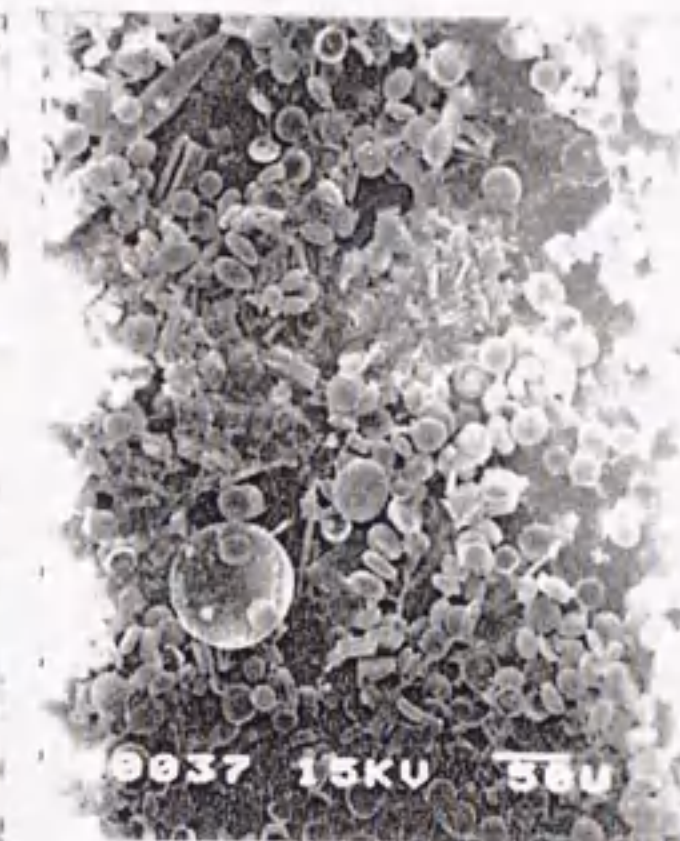
沈降粒子の主要な脂肪酸は14:0、16:0、16:1、18:0であった。脂肪酸組成は、

NO.1



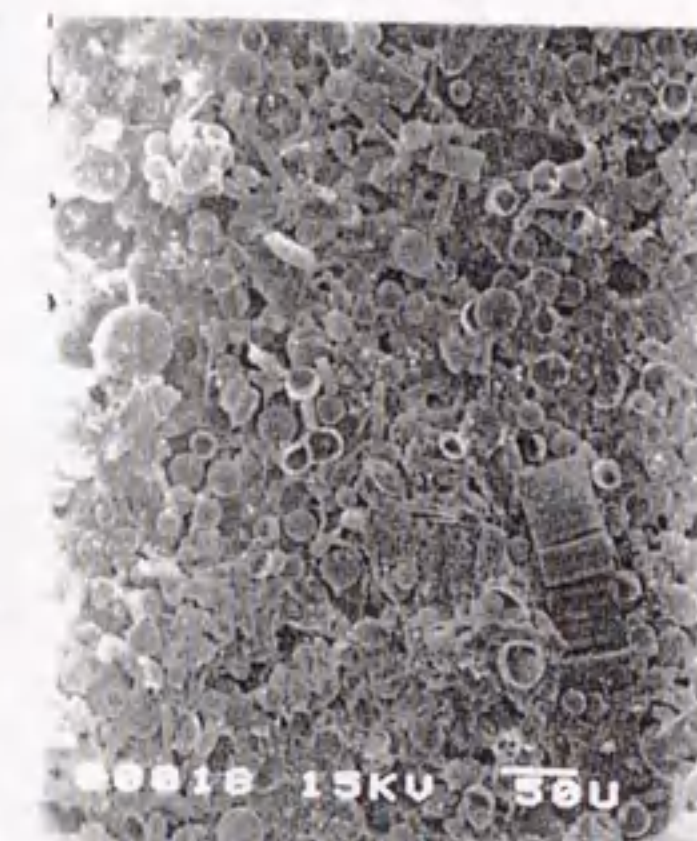
1985 1986
12/28:18-01/01:16

NO.3



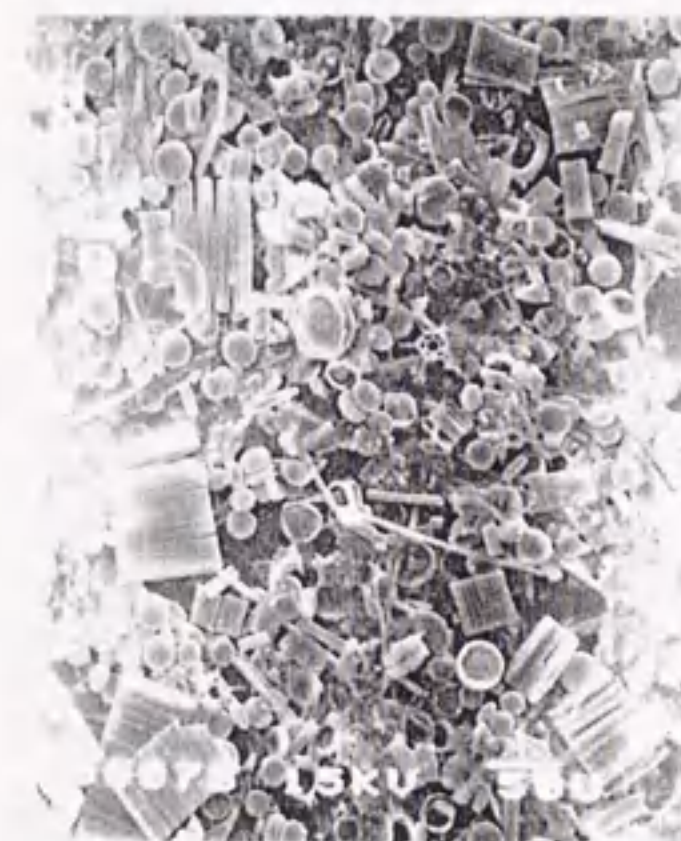
01/04:18-01/08:6

NO.5



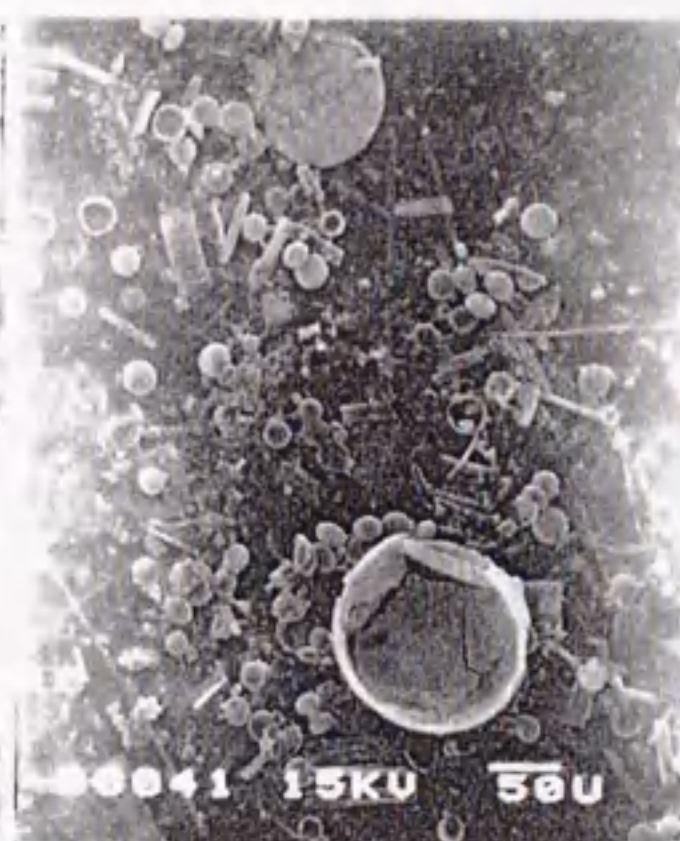
01/11:18-01/15:6

NO.7



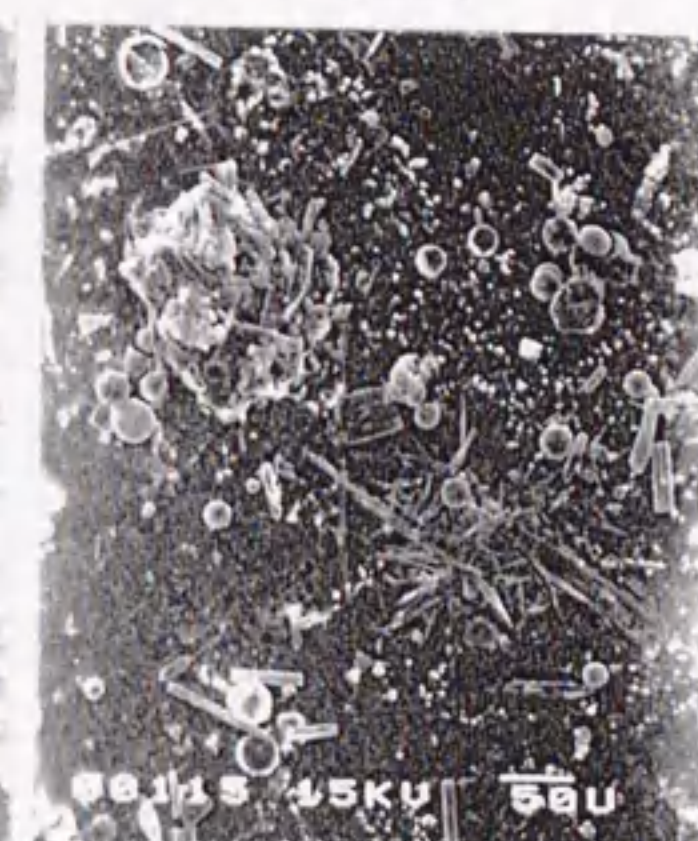
01/18:18-01/22:6

NO.9



01/25:18-01/29:6

NO.11



02/01:18-02/05:6

Fig. 25 Photos of the sinking particles in Sample No. 1, 3, 5, 7, 9, 11 taken by SEM

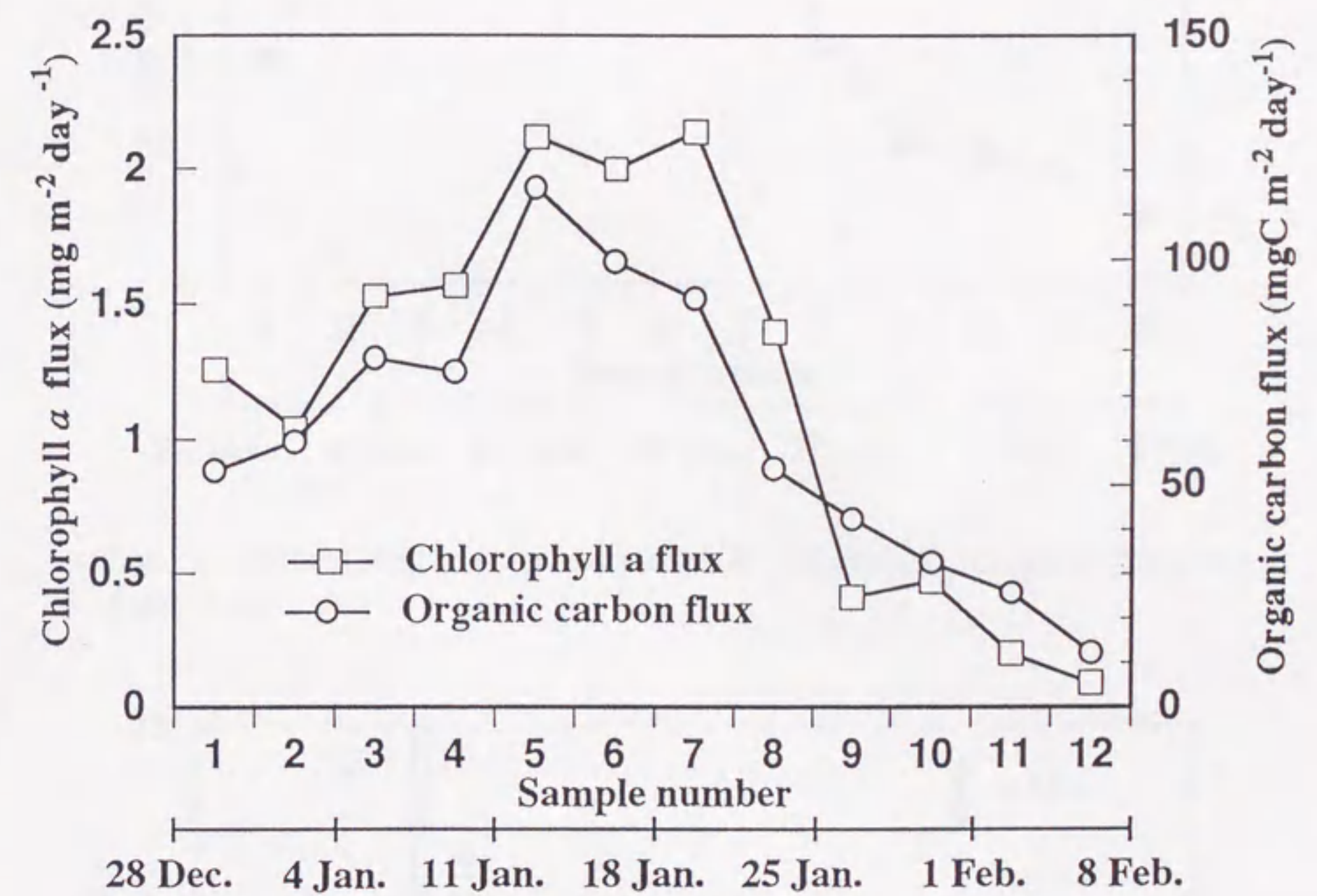


Fig. 26 Vertical fluxes of chl *a* and organic carbon of the sinking particles in Breid Bay, Antarctica.

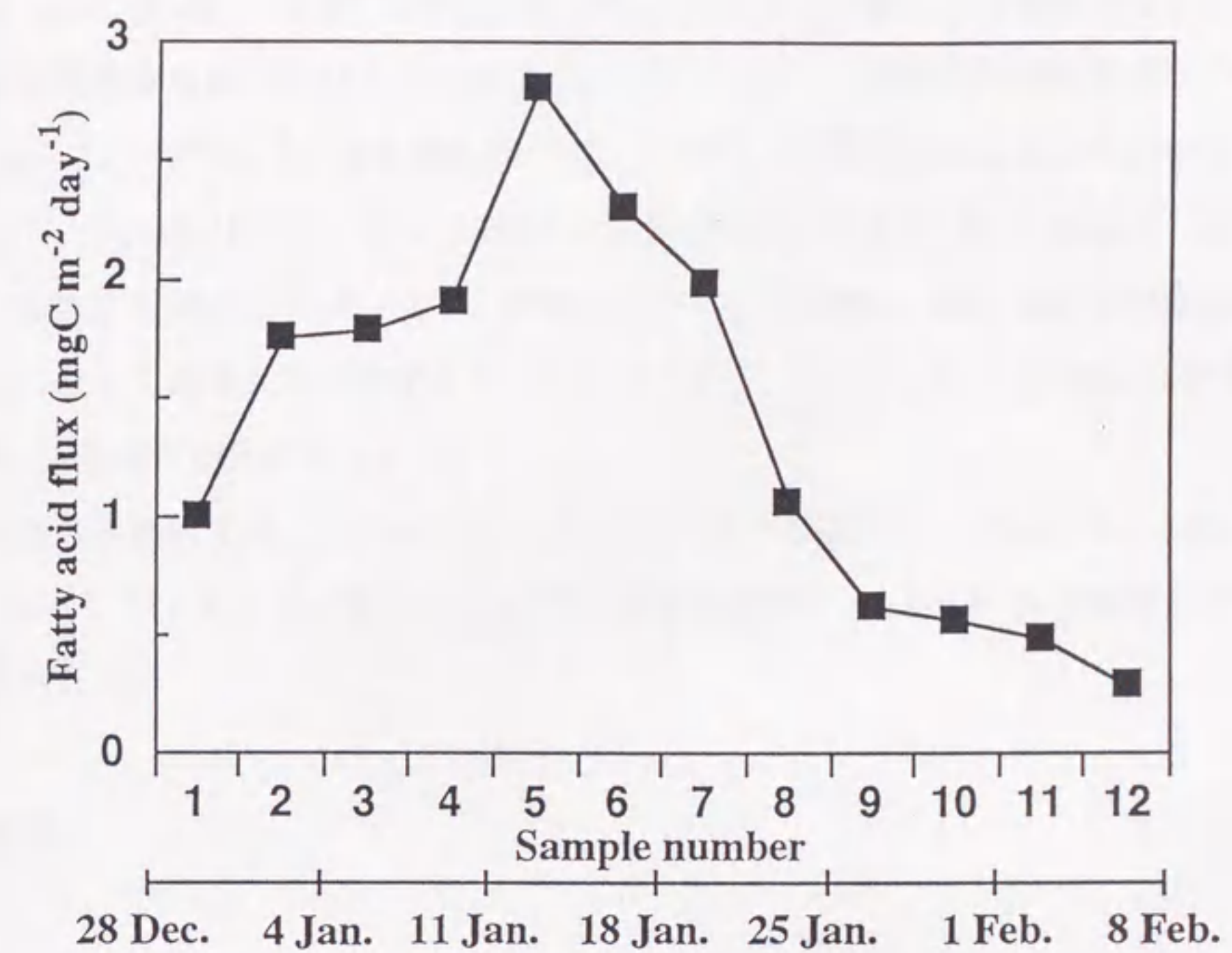


Fig. 27 Vertical fluxes of total fatty acids of the sinking particles in Breid Bay, Antarctica.

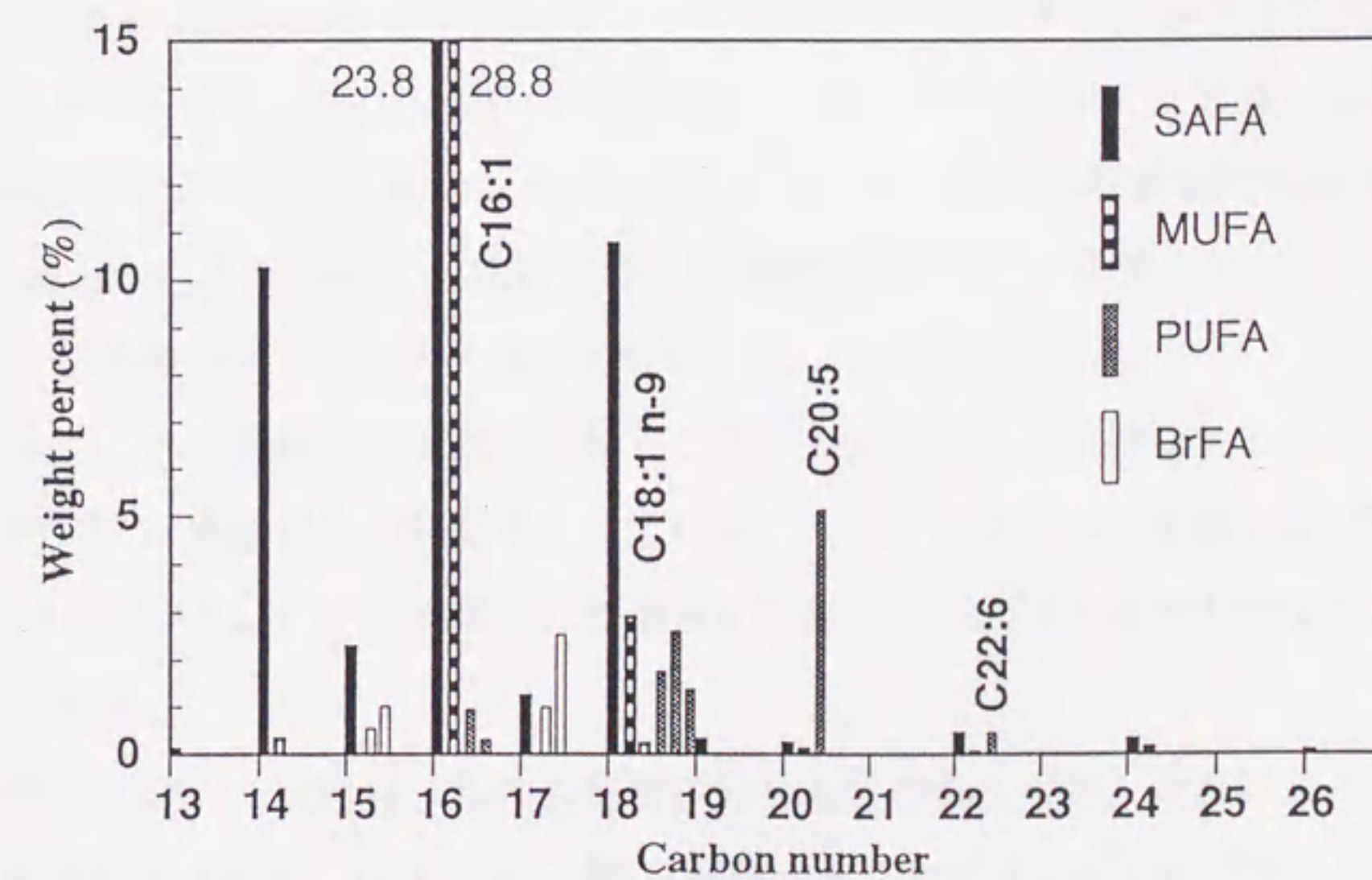


Fig. 28 Fatty acid composition of sinking particles in Sample No. 7 in Breid Bay, Antarctica

16:0と16:1で全体の 40-50 %を占めていた。また、20:5など、二重結合を2つ以上もつ多不飽和脂肪酸の割合も高かった(4.1-16.7 %)。時系列の脂肪酸組成の変化 (Table 10) を見ると、飽和脂肪酸では、16:0は、時系列にほとんど変化がないのに対して、14:0と18:0は、サンプルNo. 8以降で割合が大きく(10 %以上) になっていた。それに対称的なのが16:1で、観測の前半に全脂肪酸の 20 %以上の割合で高かった。そして最も大きく変化していたのは、20:5 であり、サンプルNo. 5からNo. 7にかけて急激な増加が見られた。

その他の脂肪酸では、18:1 n -9は、4.1-8.4 %で大きな変化をしなかった。22:6は、微量(0-0.7 %)にしか存在しなかった。分枝脂肪酸は、1.5-7.8 %の範囲で全試料で検出された。

4. 考察

4.1 沈降粒子脂肪酸にみられる沈降粒子有機物の起源

一般的に外洋で見られる沈降粒子の脂肪酸は、14:0、16:0、18:0である (Tanoue and Handa, 1980; DeBaar et al., 1983; Wakeham et al., 1984; Matsueda et al., 1986; Reemtsma et al., 1990)。これに対し、本研究でのブライド湾沈降粒子では、14:0、16:0、18:0に加え、16:1の割合が非常に高かった(最大39 %)。また、20:5も高い割合のサンプルが見られた。16:1、20:5は、ケイ藻類に特徴的な脂肪酸であり (Kayama et al., 1989)、沈降粒子の脂肪酸組成が、ケイ藻類に近いことから、沈降粒子有機物の多くは、ケイ藻類に由来していると考えられる。

しかし、ケイ藻類には少量しか見られない18:0が粒子中に存在することは、この有機物がケイ藻類以外の起源をもっている、もしくは何らかの変質を受けていることを示している。だが、海洋中に普遍的に存在する18:0から起源を特定することは困難である。

本研究で用いた試料は、別の有機物の分析も行われている。それによると、分枝C25炭化水素(生田, 1991) や、5%水酸化ナトリウムフラクション中のアラビノースの存在 (Handa et al., 1992) は、動物プランクトンの影響を示唆するものであった。脂肪酸においても、沈降粒子中の高濃度の18:1 n -9の存在は、動物プランクトン

Table 10 Fatty acid composition of the sinking particles in Breid Bay, Antarctica.

Fatty acids	No.1	No.2	No.3	No.4	No.5	No.6	No.7	No.8	No.9	No.10	No.11	No.12
Saturated												
13:0	0.50	0.28	0.50	0.14	0.11	0.10	0.10	0.94	0.92	0.11	0.42	3.56
14:0	8.01	7.54	7.94	7.91	8.86	9.07	10.25	14.07	12.98	16.56	12.25	5.79
15:0	2.95	2.99	2.85	2.54	2.03	2.06	2.27	1.96	2.22	1.47	1.69	7.46
16:0	27.98	24.61	25.25	26.43	22.67	21.32	23.80	26.63	25.76	26.89	30.31	25.87
17:0	2.01	3.42	2.36	1.96	2.33	1.40	1.23	0.68	0.77	0.59	0.72	1.15
18:0	7.04	3.17	2.39	9.39	3.15	2.99	10.77	13.51	14.48	15.55	23.32	14.59
19:0	0.20	0.22	0.17	0.13	0.27	0.06	0.32	0.51	0.68	0.56	0.09	0.27
20:0	1.14	0.32	0.30	0.37	0.28	0.22	0.24	0.71	1.50	0.30	0.43	3.13
22:0	0.59	0.29	0.22	0.43	0.30	0.38	0.44	0.51	0.55	0.84	0.75	2.74
24:0	0.36	0.24	0.23	0.35	0.24	0.25	0.31	0.30	0.42	0.34	0.34	0.97
26:0	0.14	0.07	0.06	0.08	0.09	0.10	0.08	0.09	0.00	0.00	0.00	0.00
Monounsaturated												
14:1	3.65	1.12	1.24	0.63	0.29	0.34	0.34	0.05	0.84	0.43	0.19	6.86
16:1	25.78	37.32	38.96	31.90	27.95	28.47	28.75	18.63	16.84	13.74	11.48	9.25
18:1n-9	7.31	7.73	8.36	7.45	7.50	7.31	2.91	4.08	5.08	5.37	4.55	6.64
18:1n-7	1.57	0.84	1.13	1.43	2.00	2.91	0.22	0.49	0.70	0.70	0.87	1.15
20:1	0.12	0.25	0.17	0.52	0.18	0.39	0.11	0.84	0.61	0.68	0.89	1.59
22:1	0.00	0.03	0.03	0.09	0.09	0.08	0.06	0.09	0.13	0.00	0.00	0.00
24:1	0.12	0.08	0.05	0.19	0.16	0.14	0.14	0.32	0.18	0.16	0.21	0.00
Polynunsaturated												
16:2	1.29	1.19	0.71	0.58	1.49	1.67	0.96	0.78	0.88	0.50	0.54	0.88
16:3	0.00	0.00	0.00	0.00	0.72	0.00	0.31	0.00	0.14	0.00	0.00	0.31
16:4	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
18:2	1.59	2.29	2.24	2.03	1.73	1.73	1.75	1.38	1.25	2.30	1.47	2.45
18:3	1.12	1.11	0.98	0.55	1.95	3.54	2.61	2.26	4.23	3.42	2.28	1.64
18:4	0.23	0.30	0.05	0.11	1.25	1.48	1.37	0.75	0.28	0.71	0.20	0.29
20:5	0.86	2.81	0.80	0.69	9.11	7.30	5.13	2.43	0.75	1.49	0.63	0.30
22:6	0.16	0.29	0.14	0.18	0.46	0.48	0.46	0.23	0.24	0.65	0.30	0.00
Branched												
iso 15:0	0.94	0.30	0.36	0.48	0.39	0.51	0.55	0.81	1.41	0.59	0.88	1.50
anteiso 15:0	0.41	0.13	0.22	0.39	0.48	0.71	1.01	1.36	1.80	1.44	0.96	0.51
iso 17:0	2.54	0.66	1.14	1.05	1.29	2.77	0.99	2.63	2.15	2.82	1.95	0.27
anteiso 17:0	1.42	0.42	1.17	1.80	2.66	2.20	2.53	2.96	2.12	1.70	2.28	0.82
SAFA Total	50.91	43.14	42.26	49.94	40.33	37.96	49.80	59.90	60.37	63.31	70.32	65.5
MUFA Total	38.55	47.36	49.93	42.21	38.16	39.65	32.53	24.50	24.38	21.08	18.19	25.49
PUFA Total	5.23	7.99	4.92	4.14	16.70	16.21	12.59	7.84	7.76	9.06	5.43	5.87
BrFA Total	5.31	1.51	2.88	3.71	4.82	6.18	5.09	7.76	7.48	6.55	6.07	3.11
Total	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00

(expressed as % total fatty acids)

の影響を示唆する (Wakeham et al., 1984)。しかし、ケイ藻類にも数%程の18:1n-9は含まれている (Kayama et al., 1989) ことを考えると、脂肪酸組成からは、動物プランクトンの影響を明確にすることはできなかった。

分枝脂肪酸は、バクテリア指標であり (Perry et al., 1979; Volkman et al., 1980)、その存在は、粒子中のバクテリアの存在を示している。沈降粒子中には、最大 7 % の分枝脂肪酸が見られたことは、粒子中のバクテリアの存在をアピールしている。

まとめると、脂肪酸から見られる沈降粒子有機物の起源は、主にケイ藻類であるが、沈降粒子の一部は動物プランクトンやバクテリアに由来する有機物も含まれていると考えられる。

4.2 ケイ藻ブルームの推移にともなう沈降粒子脂肪酸の変化

主にケイ藻類由来であるはずの16:1、20:5が、ブルームの推移にともない、その組成割合を変えることは、ケイ藻とは別の起源有機物 (動物プランクトンなど) の付加、または、ケイ藻類内での組成変化を考えねばならない。しかし、沈降粒子には、顕微鏡観察によりフェーカルペレットは非常に少なく、ケイ藻 *Thalassiosira antarctica* が卓越していたことより、沈降粒子有機物への動物プランクトンやそのペレットの付加は多くない。そして、脂肪酸組成からは、はっきりとしたそれらの混入の証拠は得られなかった。よって、脂肪酸の組成変化は主にケイ藻内での組成変化と考えられる。

第3章でのメソコズムの結果では、ケイ藻ブルームにおいて沈降する粒子にプランクトンの増殖にともなう脂肪酸の組成変化があった。これを本章での沈降粒子の時系列変動の中で検証した。

1) 不飽和脂肪酸/飽和脂肪酸比

沈降粒子中の飽和脂肪酸に対する不飽和脂肪酸の比をとってみる (Fig. 29) と、観測の前半に大きな値が見られ、後半には値が小さかった。沈降粒子のクロロフィル a、有機炭素の増減と比較して、この比が高いのは、クロロフィル a、有機炭素の増加時期にあたる。したがって、この比がメソコズム実験の結果同様、表層のケ

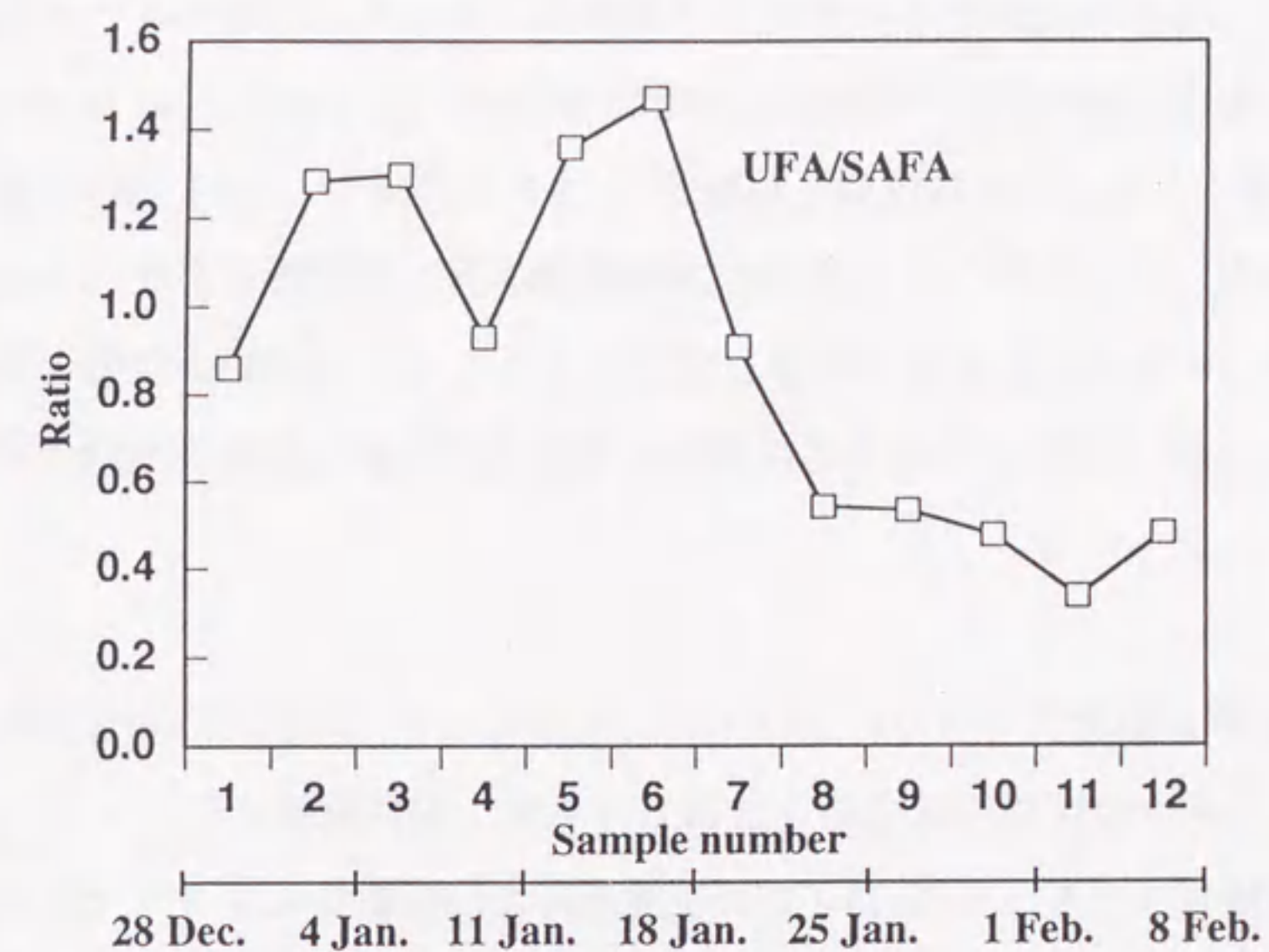


Fig. 29 Changes in unsaturated fatty acids (UFA) / saturated fatty acids (SAFA) ratio of the sinking particles in Breid Bay, Antarctica

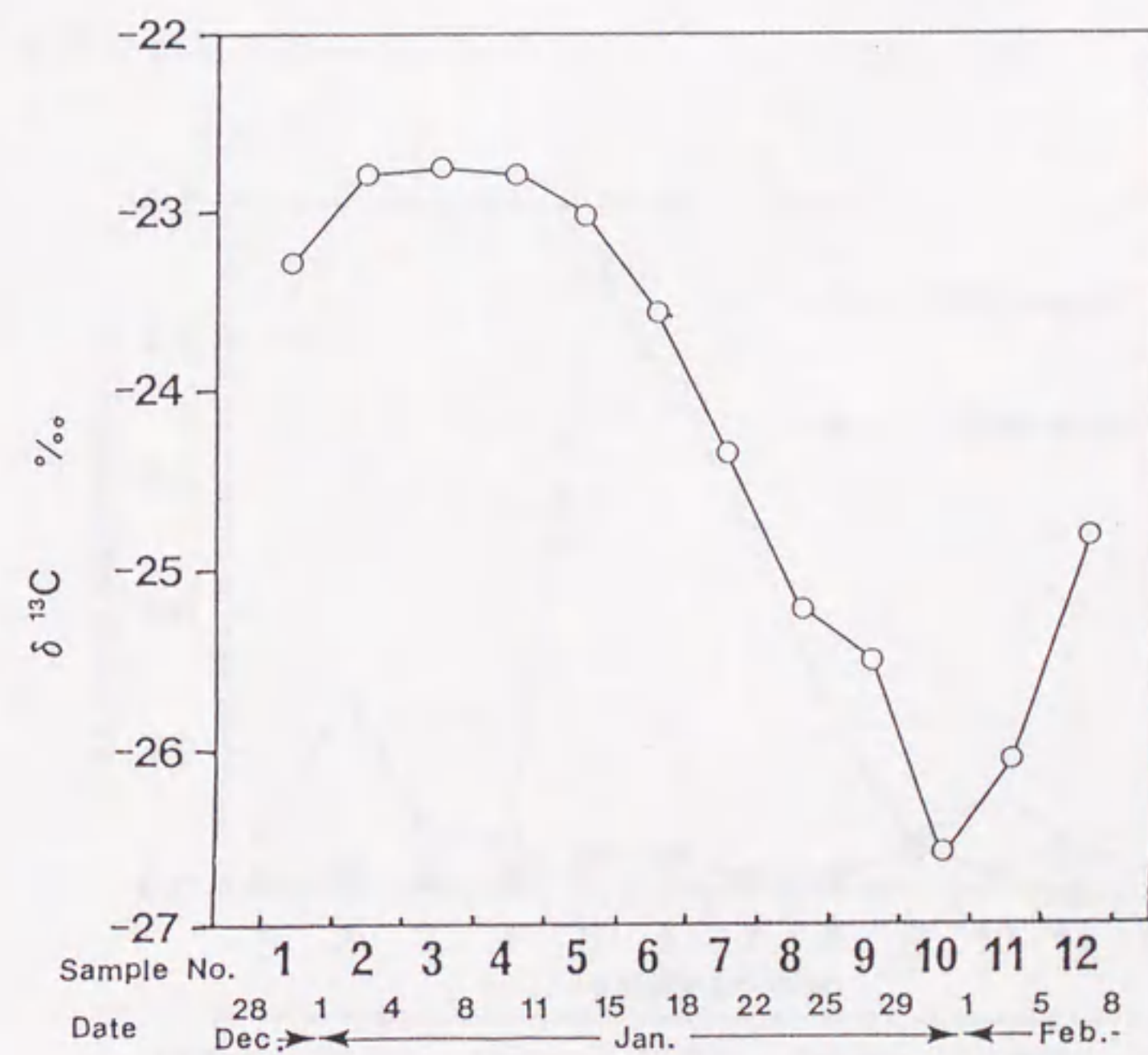


Fig. 30 Changes in the $\delta^{13}\text{C}$ values of organic carbon in the sinking particles. (After Handa et al., 1992)

イ藻ブルームの増殖によって、比が高くなっている可能性がある。

Handa et al (1992) は、本研究で用いた沈降粒子試料の有機炭素 $\delta^{13}\text{C}$ 値を測定している (Fig. 30)。これによると $\delta^{13}\text{C}$ 値は、観測の前半に高く、後半に急激な減少が見られ、不飽和脂肪酸/飽和脂肪酸比の変動とよく似ていた。有機炭素 $\delta^{13}\text{C}$ 値の変動は、表層の植物プランクトンの光合成活性によるものであり、以上より、沈降粒子中の飽和脂肪酸/飽和脂肪酸比も植物活性を示すと結論した。

2) 20:5

沈降粒子中の20:5は、サンプルNo. 5からNo. 7にかけて急激な増加があった (Fig. 31)。メソコズム実験同様、ブルームにともなう20:5の増加があったことは、20:5が植物プランクトンの増殖により生成されていること、そして、懸濁粒子に限らず沈降粒子の時系列変動においてもそれが確認されることを示す。沈降粒子ではないが、同様の報告例として、Nichols et al. (1993)は、南極氷中ケイ藻類のスプリングブルームにおいて、ケイ藻類の20:5が、生態環境因子の変化によって増加していることを見い出している。

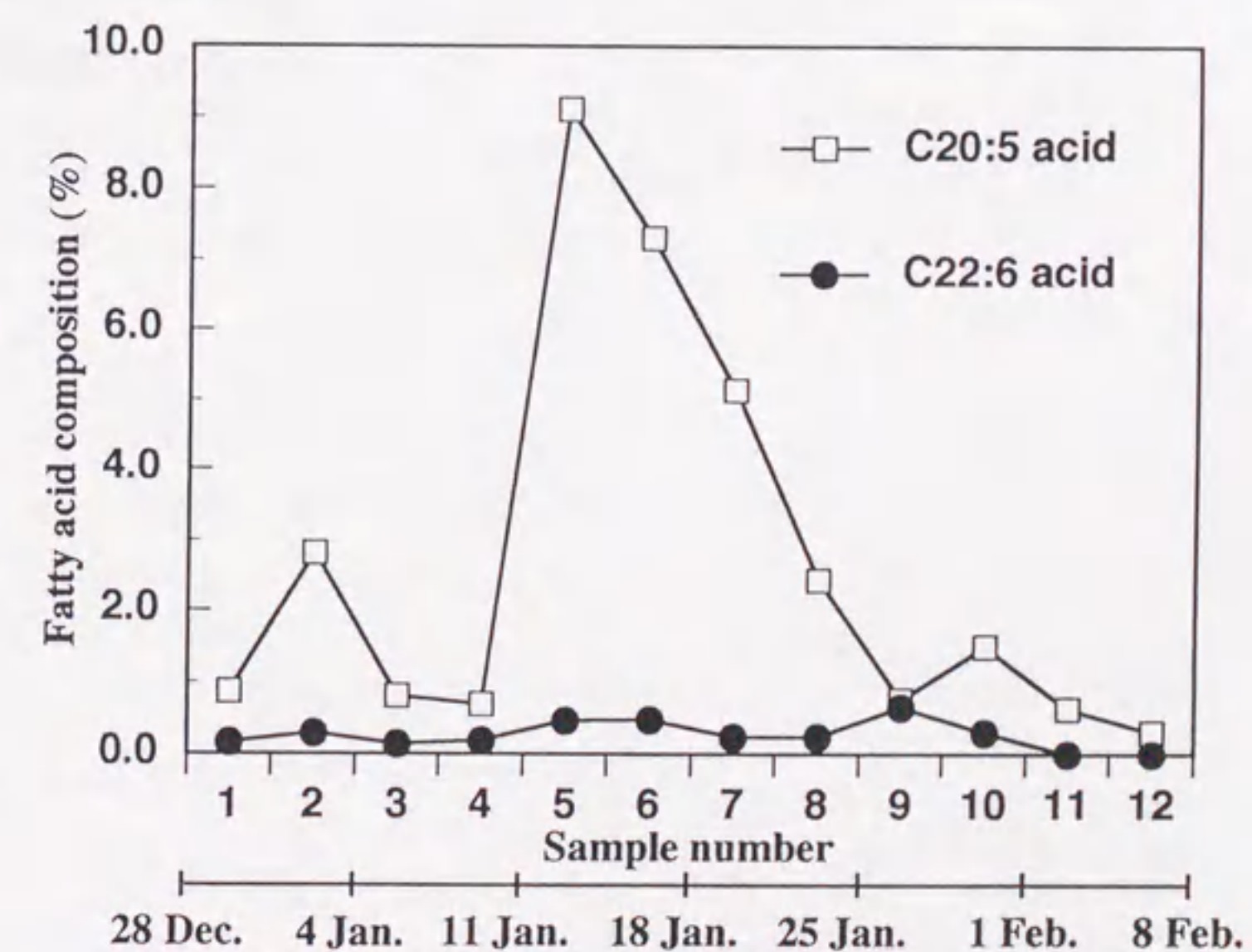


Fig. 31 Changes in the composition of 20:5 and 22:6 acids of the sinking particles in Breid Bay, Antarctica

ただし、20:5の増加時期については、検討の余地が残る。第3章のメソコズムの結果では、20:5の増加は、植物プランクトンブルームの増殖期に起こったのに対して、沈降粒子では、有機炭素フラックスがピーク時に20:5の増加が見られた。ケイ藻類の成長ステージと20:5の生成の関係については、報告例も少なく、増殖の初期での生成 (Ackman et al., 1964; Kattner and Brockmann, 1990) や、安定期での高生産 (Arao et al., 1987) などがあり統一した見解はない。今後検討が必要である。

5. まとめ

本章の南極沿岸域の沈降粒子の結果からは、ケイ藻ブルームにともなう沈降粒子脂肪酸が、ケイ藻類の生体に近い組成を持つことが明らかになった。

そして、ケイ藻ブルームにともなう沈降粒子有機物の時系列の組成変化は、ブルームの推移による植物プランクトンの生理的変化が表れていることが示された。メソコズム実験での結果同様に、20:5のブルーム中での増加や不飽和脂肪酸／飽和脂肪酸比が、ブルームの増殖期に比が高くなることが、沈降粒子にも見い出された。これらは、ケイ藻類を中心としたプランクトンブルームにおいてプランクトンの生理を示す指標となる。

第5章 沈降粒子脂肪酸の季節変動

1. はじめに

全海洋の中で一次生産の高い高緯度海域では、沈降粒子フラックスに季節変動があることが数多く報告されている (Deuser and Ross, 1980; Honjo, 1982; Honjo et al., 1988; Honjo and Manganini, 1993)。特に、海洋表層でスプリングブルームが起こる時期には、表層の一次生産量の急激な増加が、深層の沈降フラックスにも急激な増加となって現れる。フラックスだけに限らず、有機物の面からもスプリングブルーム期の違いが指摘されている (Lee et al., 1983; Ittekkot et al, 1984) が、その報告例は多くなく、脂肪酸に関してはない。

本章では、西部北太平洋海溝域で行われた時系列型セジメントトラップの試料を用い、高緯度海域にみられる沈降粒子の季節変動について、脂肪酸の面から評価を行った。

2. 試料の採集と分析方法

西部北太平洋海溝域における沈降粒子試料は、北海道大学水産学部「おしよる丸」の航海の際、日高舟状海盆の測点NNWP-01 (東経144°13'、北緯40°56'、水深5369 m、Fig. 32) の5200 m深に時系列型セジメントトラップ (PARFLUX Mark-VI型、マクレーン社製) を設置することにより得た。なお、この時系列型セジメントトラップは、北海道大学水産学部「北星丸」において回収した。観測は1988年9月10日から1989年5月28日にわたって実施し、20日毎にまとめて試料を採集した。実験期間中、合計13個の試料を得ることができた。得られた沈降粒子試料は、遠心分離で水を除去した後で、-20℃で冷凍保存をした。

有機炭素及び全窒素は、CHNコーダーによって測られた (半田ら、1989)。

脂肪酸の分析方法は、第4章の脂肪酸の分析に準じて行った。

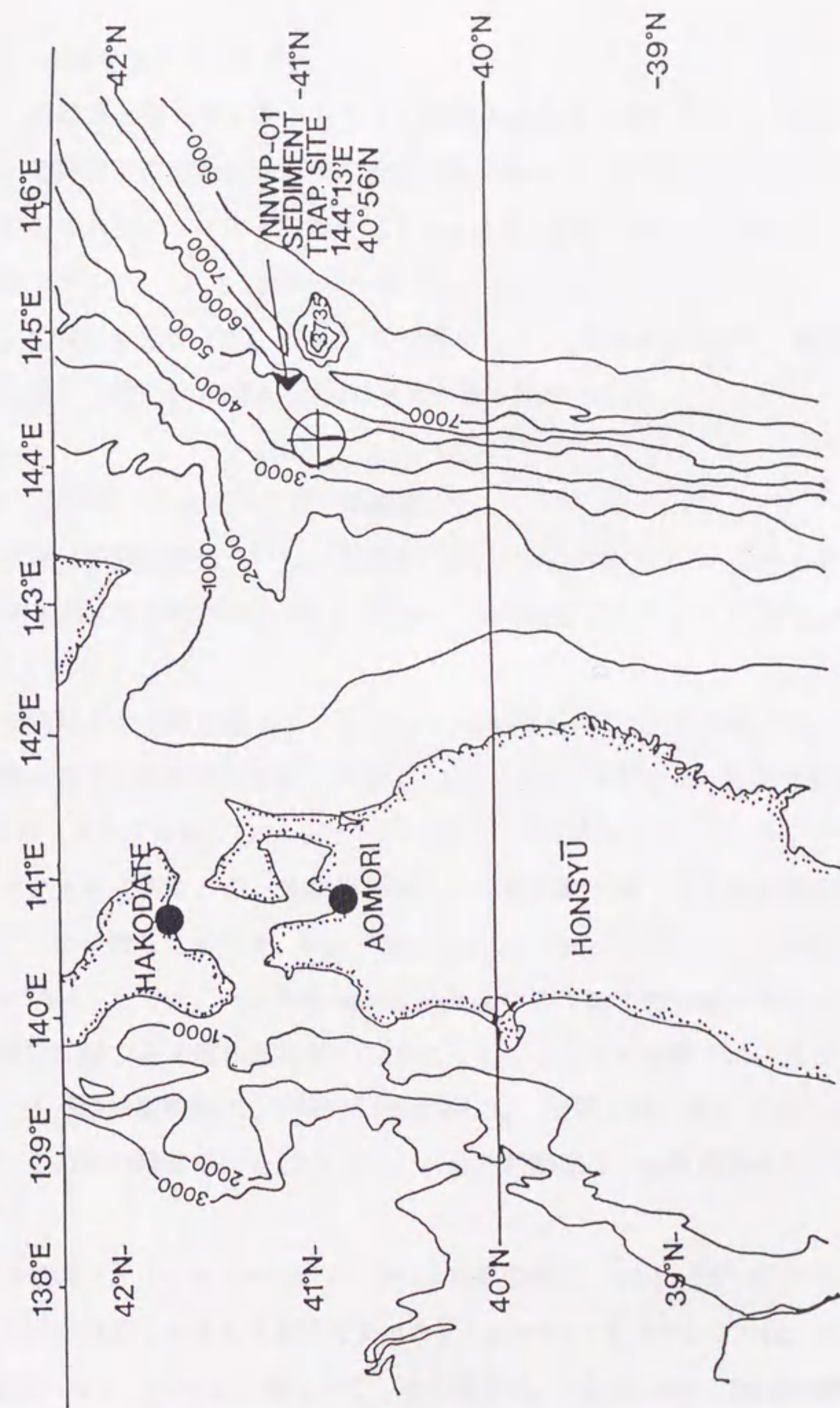


Fig. 32 Sampling location of the sinking particles collected by a sediment trap experiment in the northern part of the Japan Trench.

3. 結果

3.1 沈降粒子フラックス

この時系列型セジメントトラップ観測は、秋から春にわたって行なわれ、その結果、沈降粒子の変動には年間の季節変動が現れた。半田ら（1989）が測定したこの試料のマスフラックスと有機炭素フラックス（Fig. 33a, b）を見ると、1988年9月（サンプルNo. 1）と1989年4-5月（サンプルNo. 12, 13）にフラックスが大きかった。C/N比を見る（Fig. 33c、半田私信）と、1988年9月では、観測中でC/N比が最も高く、逆に1989年4-5月はC/N比が最も低かった。

3.2 脂肪酸フラックス及びその組成

沈降粒子脂肪酸について、炭素数13以上の脂肪酸について分析を行ない、炭素数28のものまでが検出された。沈降粒子の全脂肪酸のフラックスをFig. 34に、組成をTable 11に示した。

沈降粒子の全脂肪酸フラックスは、1989年4-5月に大きな値が見られた。有機炭素量に対する脂肪酸炭素量の割合は、2.9 - 37.1 %だった。脂肪酸組成では、1988年9月（サンプルNo. 1）と1989年4-5月（サンプルNo. 12, 13）が、その他の時期のものと大きく異なった。飽和脂肪酸、一不飽和脂肪酸、多不飽和脂肪酸、分枝脂肪酸ごとに分類したものを、Fig. 35に示した。1988年9月に一不飽和脂肪酸が多く、1989年4-5月では、一不飽和飽和脂肪酸及び多不飽和脂肪酸が増加している。飽和脂肪酸に対する不飽和脂肪酸の比をとると、それらの時期では、比が1を越えていた。多不飽和脂肪酸は、1989年4-5月期には、全脂肪酸に対して 25.6 - 35.6 %であり、その他の時期では4-17 %だった。分枝脂肪酸は、全脂肪酸の3.4-10.9 %であった。

1988年9月（サンプルNo. 1）での主な脂肪酸は、18:1 *n*-9が 40.2 %と一番多く、次に16:0が多く含まれる組成であった。1989年4-5月（サンプルNo. 12, 13）では、16:1が 24.2 - 26.3 %と最も多く、その他14:0、16:0、18:0、20:5が優勢であった。20:5が 20.0 - 30.0 %と多かったのは、特徴的である。（Table 11）。

有機炭素フラックスの少ない時期、1988年の10月から1989年3月には、飽和脂肪

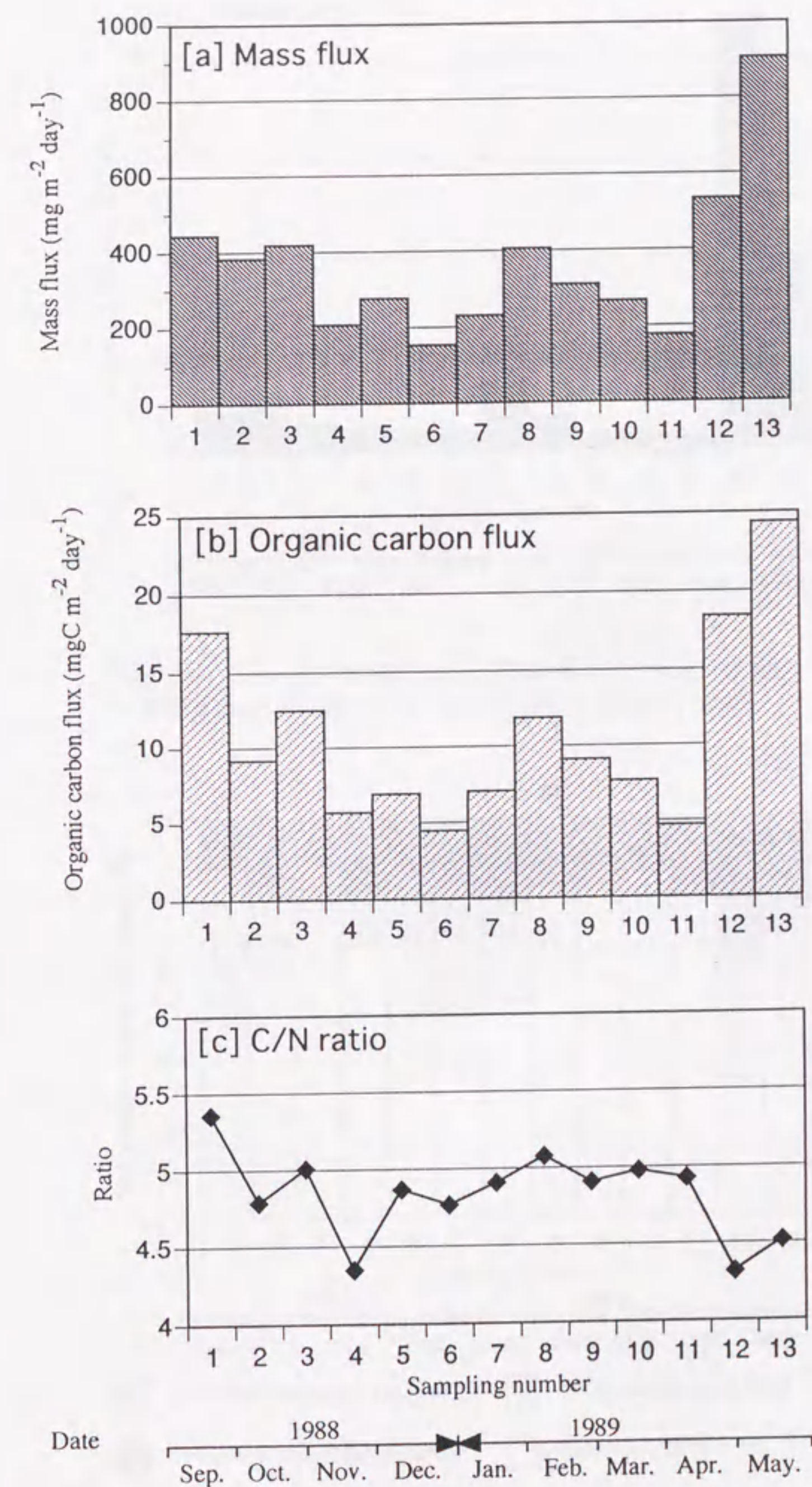


Fig. 33 Temporal variations of (a) Mass fluxes, (b) organic carbon fluxes and (c) C/N ratio of the sinking particles in the northern part of the Japan Trench.

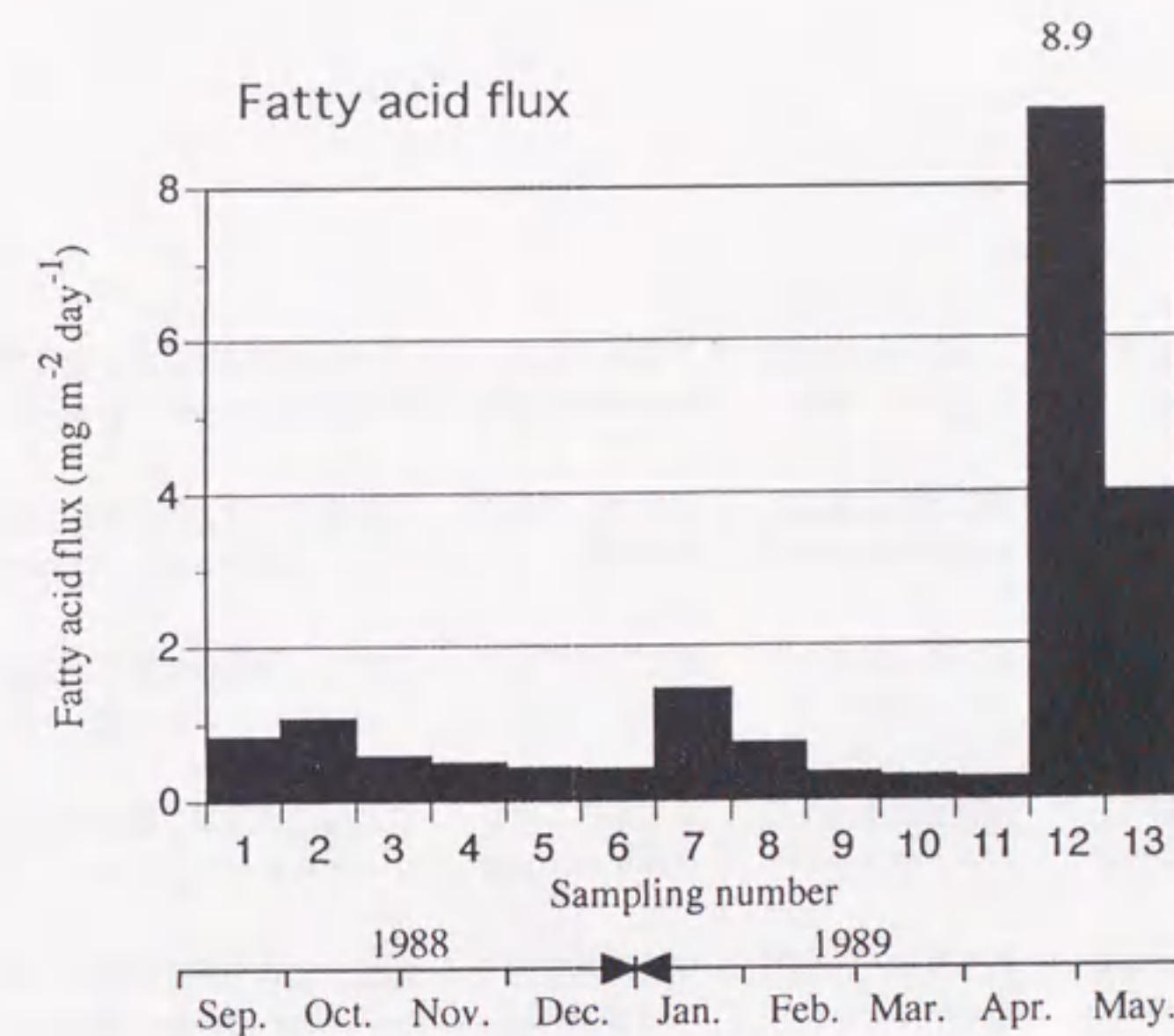


Fig. 34 Changes in the fluxes of total fatty acids of the sinking particles in the northern part of Japan Trench.

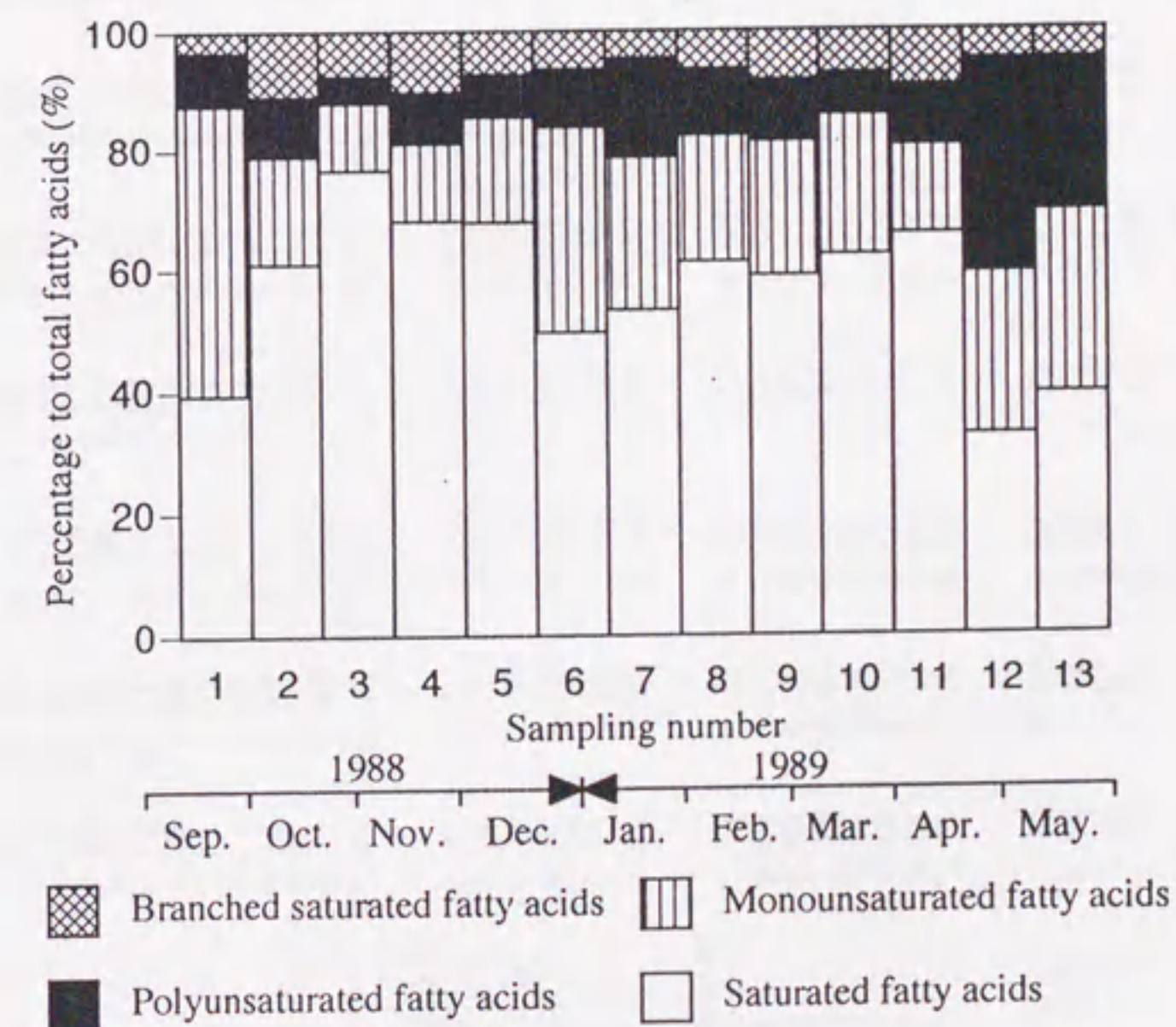


Fig. 35 Temporal variation of the percentage composition of saturated fatty acids (SAFA), monounsaturated fatty acids (MUFA), polyunsaturated fatty acids (PUFA) and branched saturated fatty acids (BrFA) in the sinking particles in the northern part of the Japan Trench.

Table 11 Fatty acid composition of the sinking particles in the northern part of the Japan Trench.

Fatty acids	No.1	No.2	No.3	No.4	No.5	No.6	No.7	No.8	No.9	No.10	No.11	No.12	No.13
Saturated													
13:0	0.60	6.21	0.16	4.12	0.52	5.40	1.37	0.94	1.41	4.15	3.88	0.33	0.05
14:0	4.44	7.63	7.22	11.06	6.04	7.19	6.04	8.66	8.71	7.81	9.37	6.28	7.36
15:0	1.11	5.06	2.84	5.59	2.94	6.21	2.10	2.60	3.04	3.85	3.52	0.65	0.56
16:0	20.04	19.59	37.52	23.20	27.26	15.27	26.96	24.02	20.88	19.58	20.13	17.13	18.97
17:0	0.90	2.07	1.38	1.56	0.90	0.73	0.88	1.75	1.36	1.15	1.50	4.09	0.40
18:0	6.75	11.67	18.64	14.54	17.05	7.28	10.26	12.63	11.81	11.59	15.86	3.28	9.94
19:0	0.30	0.80	0.00	0.54	0.57	0.88	0.25	0.27	0.38	0.09	0.55	0.20	0.15
20:0	2.31	4.21	1.51	1.18	0.92	2.01	1.24	3.15	2.77	3.86	3.63	0.25	0.63
22:0	1.71	0.88	2.77	3.30	2.61	1.80	3.13	1.84	2.54	3.48	1.82	0.11	0.52
23:0	0.16	0.44	0.8	0.53	0.77	0.16	0.17	0.43	0.44	0.71	0.61	0.09	0.14
24:0	0.52	0.98	2.22	1.53	2.25	1.16	0.61	1.9	2.34	2.4	1.91	0.09	0.27
26:0	0.32	1.07	1.50	0.93	1.63	1.56	0.49	1.26	1.52	1.74	1.15	0.11	0.19
28:0	0.28	0.53	0.00	0.00	4.37	0.00	0.00	1.66	1.52	1.81	1.81	0.04	0.14
Monounsaturated													
14:1	0.72	6.79	0.16	4.21	1.77	11.81	3.19	2.21	2.28	5.92	4.11	0.31	0.22
16:1	6.04	5.72	3.04	2.17	7.55	7.26	3.90	8.97	10.13	7.60	3.08	24.19	26.27
18:1n-9	40.17	2.50	2.15	1.51	3.88	5.34	8.71	6.47	5.81	5.44	3.49	1.97	2.78
18:1n-7	0.41	1.64	2.97	2.34	2.26	2.48	2.71	3.01	3.37	3.20	1.88	0.02	0.78
20:1	0.23	0.78	3.14	2.33	2.21	5.47	4.84	0.24	0.52	0.88	0.41	0.05	0.00
22:1	0.27	0.12	0.00	0.00	0.00	1.89	1.01	0.00	0.00	0.00	0.17	0.04	0.00
24:1	0.38	0.29	0.00	0.52	0.00	0.00	1.0	0.27	0.37	0.47	1.66	0.06	0.12
Polyunsaturated													
18:2	1.01	2.90	0.35	1.33	0.92	1.07	0.88	1.43	1.78	1.54	1.11	2.32	0.82
18:3	0.52	1.21	0.25	1.82	0.4	3.03	1.37	0.88	1.39	0.72	0.51	0.00	1.29
18:4	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
18:2	1.10	1.41	0.46	0.62	0.61	1.22	12.06	1.25	1.27	0.85	0.98	0.87	0.86
18:3	0.61	1.57	0.70	1.97	1.69	1.20	1.36	0.38	1.10	0.59	3.43	0.55	0.35
18:4	0.50	0.76	0.45	0.92	1.25	0.40	0.15	0.44	0.28	0.38	1.28	0.18	1.14
20:5	3.39	1.46	1.05	1.32	1.78	1.78	0.45	4.31	2.86	1.61	1.82	30.04	20.03
22:6	1.75	0.88	1.08	0.54	0.44	1.04	0.42	2.52	1.56	1.22	0.92	1.66	1.16
Branched													
iso 15:0	1.19	3.88	2.64	2.89	2.45	1.56	1.25	1.22	2.60	2.24	4.71	0.44	0.30
anteiso 15:0	0.69	3.32	1.08	2.24	1.78	1.34	1.91	0.92	1.41	0.98	2.67	0.34	0.16
iso 17:0	0.38	1.63	0.90	2.03	1.24	1.23	0.36	0.46	0.28	0.40	0.72	2.08	2.51
anteiso 17:0	1.19	2.02	2.97	3.15	1.86	2.25	1.10	3.86	4.14	3.68	1.29	2.23	1.91
SAPA Total	39.45	61.12	76.62	68.09	67.85	49.63	53.31	61.16	58.83	62.26	65.74	32.65	39.32
MUFA Total	48.23	17.84	11.47	13.09	17.67	34.25	25.38	21.18	22.48	23.52	14.81	26.64	30.16
PUFA Total	8.88	10.19	4.33	8.52	7.15	9.73	16.69	11.21	10.25	6.92	10.06	35.62	25.64
BrFA Total	3.44	10.85	7.58	10.31	7.33	6.38	4.62	6.46	8.43	7.30	9.39	5.09	4.89
Total	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00

(expressed as % total fatty acids)

酸が多く、14:0、16:0、18:0で5割近くを占めていた。

4. 考察

4.1 沈降粒子フラックスの特徴

時系列型セジメントトラップ観測の結果には、沈降粒子フラックスの年間の季節変動が現れた (Fig. 33a, b)。1988年9月と1989年4-5月のマスフラックスと有機炭素フラックスが大きかったことは、海洋表層での一次生産が活発であったことが考えられ、季節的に、それらの時期が秋季のプランクトンブルームと春季のプランクトンブルームであったことが推測される。

C/N比を見る (Fig. 33c) と、1988年9月に、観測中で C/N 比が最も高く、逆に1989年4-5月はC/N比が最も低い。Honjo and Manganini (1993)は、北部大西洋での沈降粒子の季節変動を観測しており、ブルーム期にあたる沈降粒子のC/N比が低いと報告している。ブルーム期の沈降粒子のC/N比が低いことは、その他の海域でも報告されており (Lohrenz et al., 1992; 早川ら, 1995)、こうした現象は一般的なものであると考えられる。1988年9月は、逆にC/N比が高く、それらの例とは異なる。

4.2 沈降粒子脂肪酸の変動

秋季及び春季の植物プランクトンブルームに相当する1988年9月と1989年4-5月の沈降粒子は、他の時期の沈降粒子と比べて異なることが有機炭素フラックスやC/N比において示された。しかし、その差異は沈降粒子脂肪酸においてさらに明確である。

沈降粒子の全脂肪酸フラックスは、有機炭素フラックスの変動とは大きく異なり、1989年4-5月に大きなフラックスが見られた (Fig. 34)。この時期の有機炭素に対する脂肪酸炭素の割合は、12.3-37.1 %であった。メソコズム実験の結果より、粒子中の脂肪酸の量からは生成に関わる現象を解析できないことがわかっている。そのため、1989年4-5月のみ、脂肪酸フラックスが大きくなったことはよくわからない。

全脂肪酸に対する一不飽和脂肪酸と多不飽和脂肪酸とを加えた割合は、それらの時期に5割を越えていた。植物プランクトンや動物プランクトンには、不飽和脂肪

酸が多く含まれる (Chuecas and Riley, 1969)。一方、デトリタスには飽和脂肪酸が多くなる (Shultz and Quinn, 1973)、フェーカルペレットには飽和脂肪酸が多い (Tanoue et al., 1982; Harvey et al., 1987)。これらのことから、秋季、春季のプランクトンブルーム期の沈降粒子の有機物 (脂肪酸) が、他の時期より生体に近い有機物がある可能性がある。また、1988年の10月から1989年3月には、飽和脂肪酸を中心とする組成であり、過去のセジメントトラップ実験で報告される沈降粒子 (DeBaar et al., 1983) に近いものと思われる。

1988年9月 (サンプルNo. 1) のフラックスは、Table 11を見ると、16:0と18:1 n -9で60%を占めている。培養による植物プランクトンの脂肪酸組成を報告した文献 (Chuecas and Riley, 1969; Pohl and Zurheide, 1979; Cobelas and Lechado, 1989; Kayama et al., 1989) の中に、18:1 n -9が40%を占める植物プランクトンはない。18:1 n -9が多く含まれる海洋生物は、動物プランクトンや高次の捕食者である (Joseph, 1989)。Wakeham et al. (1984)は、18:1 n -9が多く含まれる沈降粒子は、動物プランクトンの影響を強く受けているとしている。よって、サンプルNo. 1の沈降粒子試料は、植物プランクトン種で構成されているのではなく、動物プランクトンやその糞粒などを多く含むものであると推測される。

1989年4-5月の時期 (サンプルNo. 12, 13) には、16:1、16:0、20:5が優勢であった。これはケイ藻類に特徴的にみられる脂肪酸組成である (Pohl and Zurheide, 1979; Cobelas and Lechado, 1989; Kayama et al., 1989)。したがって、この時の沈降粒子がケイ藻ブルームに由来していることが考えられる。沈降粒子有機物は、通常、従属栄養生物によって変質を受けているとする報告例が多い (Wakeham et al., 1989)。その中で、本研究の春季ブルーム期の沈降粒子脂肪酸がケイ藻類の組成に近かったことは、この沈降粒子が、ケイ藻類の凝集によってマリンスノーとして急速に沈降していることが考えられる。

4.3 不飽和脂肪酸/飽和脂肪酸比

沈降粒子脂肪酸の飽和脂肪酸に対する不飽和脂肪酸の比をとると、Fig. 36のようになった。メソコズム実験、植物プランクトンブルームの沈降粒子では、植物プラ

ンクトンの成長活性によって、不飽和脂肪酸／飽和脂肪酸比が高くなることを見出した。年間の沈降粒子の季節変動では、脂肪酸組成の変化は、その海域に生息する植物プランクトン群集の組成変動の上に成り立つものであり、さらに、沈降粒子が動物プランクトン、フェーカルペレットを含むものであることを考慮すると、植物プランクトンの成長活性だけでは説明がつかない。

しかし、植物プランクトンブルーム時には、植物プランクトンの増加とともに捕食者である動物プランクトンの増加もある (Vinogradov et al., 1973)。Ittekkot et al (1984)は、沈降粒子のアミノ糖のフラックスのうち、スプリングブルームの時期にキチン質由来のヘキソサミンのフラックスが増加することを指摘している。これは、植物プランクトンブルームによって、動物プランクトン由来の有機物が増えることを意味する。動物プランクトンは、一不飽和脂肪酸や多不飽和脂肪酸を多く含む (Joseph, 1989)。その糞粒には、多不飽和脂肪酸はあまり含まれないが、一不飽和脂肪酸は多く含まれる (Harvey et al., 1987)。したがって、植物プランクトン

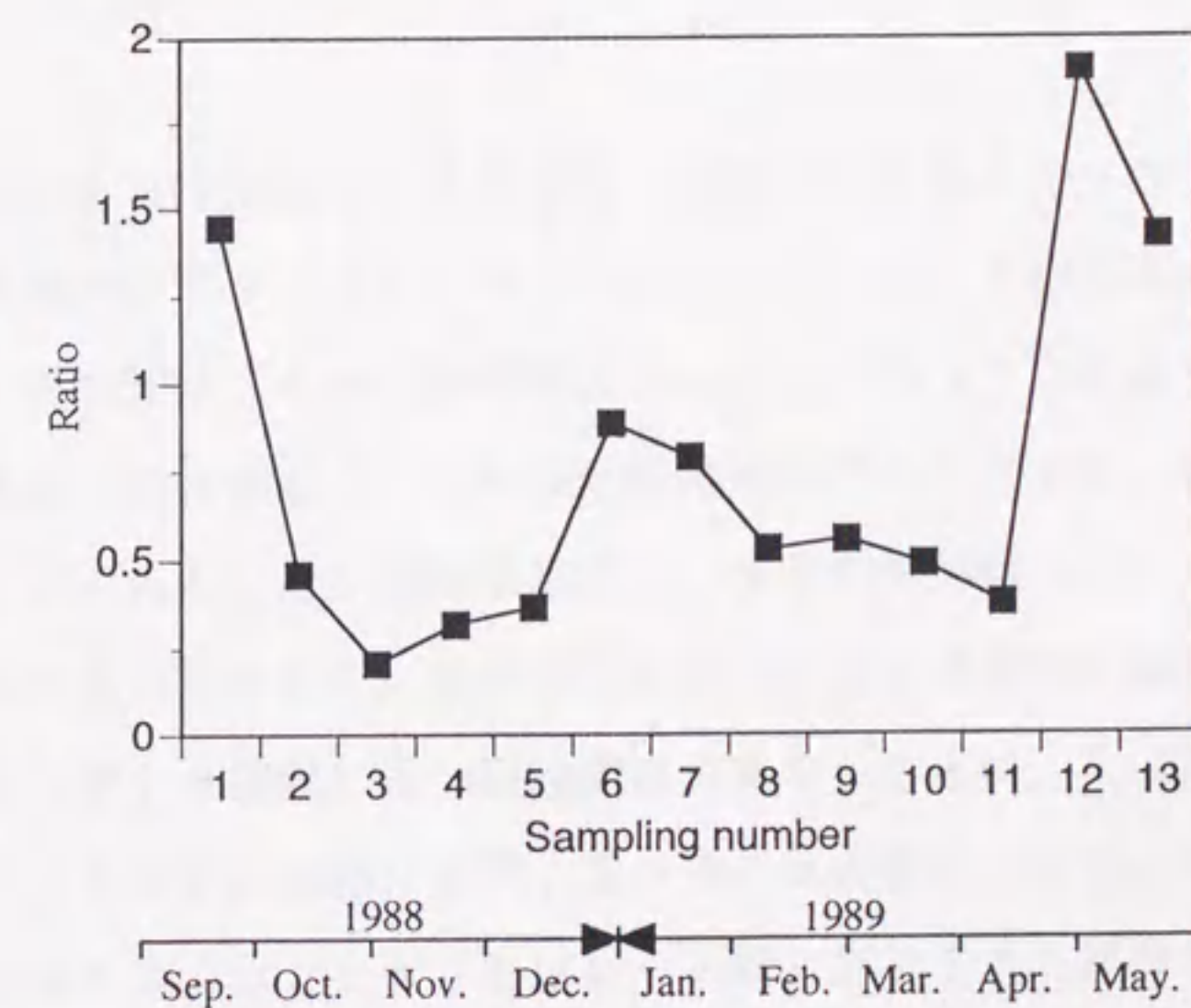


Fig. 36 Changes in the unsaturated fatty acids (UFA) / saturated fatty acids (SAFA) ratio of the sinking particles in the northern part of the Japan Trench.

ブルームによって、動物プランクトンやフェーカルペレットが沈降粒子中に増えることは、不飽和脂肪酸／飽和脂肪酸比を大きくする方へ働く。

また、植物プランクトンの凝集によるマリンスノーにせよ、フェーカルペレットにせよ、プランクトンブルーム時の急速な粒子の沈降は、微生物の分解が十分に行われる前に、生化学的に不安定である不飽和脂肪酸を深層へ輸送できる。Ducklow et al. (1985)は、沈降粒子中の微生物の活性について調べており、粒子中の微生物量は多いが、活性は低いことを観察している。微生物による有機物の分解が十分に行われていないうちに、粒子が沈降していることを指摘している。急速な粒子の沈降も、不飽和脂肪酸が保存される意味において、不飽和脂肪酸／飽和脂肪酸比にとってプラスに働く。

こうした理由より、プランクトンブルーム時の沈降粒子の不飽和脂肪酸／飽和脂肪酸比は高くなると考えられる。

5. まとめ

高生産海域である西部北太平洋海溝域で観測した沈降粒子フラックスの年間変動には、秋季と春季にプランクトンブルームによるものと思われる大きなフラックスが見られた。脂肪酸は、それらの時期において、フラックスのみならず、組成の上で不飽和脂肪酸の割合が多く、明らかに同時期のフラックスが、他の時期と異なるものであることがわかった。脂肪酸組成は、秋季の沈降粒子には、動物プランクトンに由来するものが見られた。春季の沈降粒子にはケイ藻類に由来するものが見られた。沈降粒子がケイ藻類に近い脂肪酸組成をもつことは、ケイ藻類が凝集によってマリンスノーを形成、急速に沈降していることが示唆された。また、不飽和脂肪酸／飽和脂肪酸比が、プランクトンブルーム時に形成される沈降粒子を区別する上で効果的であることを見出した。

1. 本研究のまとめ

本研究によって得られた知見をまとめる。

1) メソコズム実験を行い、懸濁粒子中の脂肪酸が制御される要因について検討を行った。懸濁粒子中の脂肪酸量は、極性脂質中の脂肪酸の場合、植物プランクトン量に依存すると考えられたが、貯蔵性脂質であるトリグリセライド中の脂肪酸は植物プランクトンブルームの成長ステージの安定期から死滅期にかけて多かった。懸濁粒子中の全脂肪酸量は、各脂質中の脂肪酸を総和したものであり、生物量を反映するのでも、生理的要因だけを反映するものでもない。

脂肪酸の組成変動の因子分析から、脂肪酸の時系列に変動する要因を決定することができた。それらはメソコズム内に存在したケイ藻類や渦鞭毛藻類、バクテリア由来と判断された。したがって、脂肪酸の組成を決める要因としては生物群集の遷移が重要であるとわかった。また、それらの脂肪酸の変動に対する寄与率も計算された。脂肪酸組成の時系列変動には、生物群集組成、特に植物プランクトンの種遷移が大きく影響する一方、植物プランクトンの生態環境の変化、成長ステージの推移による生理的变化は、それに比べ影響が小さいと考えられた。

2) メソコズム実験中の沈降する粒子の脂肪酸分析の結果、メソコズム内には他の植物プランクトンも存在したが、沈降する粒子はケイ藻類の脂肪酸組成であった。さらに、その脂肪酸組成の時系列変化は、ケイ藻群集の増殖段階に合った組成変化が見られた。これらのことから、高緯度海域や沿岸域で見られるケイ藻類のプランクトンブルームが起るとき、沈降粒子には、ケイ藻類の沈降があり、ブルームの推移にともなう脂肪酸の組成変化があることが示唆された。

南極沿岸域におけるケイ藻類を中心とする植物プランクトンブルームにおける沈降粒子の観測においても、ケイ藻類に近い脂肪酸組成が、沈降粒子に見られた。さらに、プランクトンの増殖にともなう脂肪酸組成の変化も観測された。この結果、

懸濁粒子、沈降粒子中の20:5や不飽和脂肪酸／飽和脂肪酸比は、植物プランクトンブルームにおけるプランクトンの生理を示す指標となることが示された。

3) 高生産海域である西部北太平洋海溝域で観測した沈降粒子フラックスの年間変動では、スプリングブルーム時に相当する沈降粒子フラックスが、ケイ藻類に近い脂肪酸組成をもっていた。スプリングブルームにおける沈降粒子は、ケイ藻類の凝集によってマリンスノーを形成し、急速に沈降していることが示唆された。他の時期には、ケイ藻類に近い脂肪酸組成は見られず、通常期とブルーム期の沈降粒子では、明らかに脂肪酸組成が異なるものであると判明した。また、不飽和脂肪酸／飽和脂肪酸比が、プランクトンブルーム時に形成される沈降粒子を区別する上で効果的であることを見出した。

2. 脂肪酸の指標性

海洋懸濁粒子の脂肪酸の組成が、海水中の生物群集組成に支配されており、懸念されていた生理的因子が小さかったことで、脂肪酸組成から、植物群集組成を推定することができるといえる。特に、本研究で用いた多変量解析（因子分析）の手法を用いることで、多試料数で多彩な起源をもつ試料（時系列試料、空間分布試料）に対して、因子の決定と寄与率の算出から試料有機物の起源の推定とその割合が推測できる。こうした試みは、最近になり始まっているが（Reemtsma and Ittekkot, 1992）、本研究の結果を受けてそれらは正当化されよう。

沈降粒子中の脂肪酸は、主に海洋表層水中の生物活動に由来するため、表層水での一次生産量の見積もりの指標となることが期待された。本研究のメソコズムの結果は、脂肪酸のうち、極性脂質の脂肪酸は生物量を反映することが見出された。しかし、極性脂質は、水塊中で生物、化学的に不安定であるため、沈降粒子には応用できない。よって、粒子中の脂肪酸は、表層水での一次生産量や生物量の指標とはならない。

しかし、植物プランクトンブルーム期には、ケイ藻類の直接の沈降が考えられ、南極ブライド湾での沈降粒子の観測に見られるように、表層水での生物生産の状態

を把握することができる。

不飽和脂肪酸／飽和脂肪酸比は、植物プランクトンブルームの沈降粒子には、植物プランクトンの増殖による、比の増加が確認され、沈降粒子が主に植物プランクトンに由来するという条件付きながら、植物プランクトンの成長の指標となるといえる。しかし、西部北太平洋海溝域の沈降粒子試料に見られるように、動物プランクトンの関与によっても、この比が高くなることが示唆され、今後、培養実験によって、植物プランクトン、動物プランクトン、フェーカルペレットの増殖速度と不飽和脂肪酸／飽和脂肪酸比の関係を定量化することで、不飽和脂肪酸／飽和脂肪酸比が生物の増殖度を示すパラメーターとなることが期待される。

3. 炭素循環における植物プランクトンブルーム期の沈降粒子

沈降粒子の観測に関しては、まだ問題とされる点が多く残されている (Knauer and Asper, 1989)。トラップの形状とともに、トラップ粒子周りでの乱流による粒子束の捕集効率の問題 (Gardner, 1977; Noriki and Tsunogai, 1986)、海流などによる水平方向の粒子の流れによる粒子の付加、バッチ状に存在する生物群集からの沈降粒子などの影響、捕集後の粒子の保存 (Gardner et al., 1983)、セジメントトラップに飛び込む swimmer (自泳能力をもつ生物) の評価 (Lee et al., 1988) などがある。こうした問題を解決しなければ、真のフラックスを求めることはできない。

沈降粒子の季節変動もこうした問題の一つとしてとらえることができる。これまで、様々な海域で様々な時期に行われてきた沈降粒子観測に対して、それらが海洋の平均像をとらえているかは、これからの季節変動や各海域での特性の評価によって始めて明らかとなる。

高生産海域では、沈降粒子フラックスに季節変動があることが知られ (Deuser, 1986; Wefer, 1990)、年間のフラックスの大小差が、南極海のように激しい海域もある (Wefer et al., 1988)。Wefer (1990) は、沈降粒子の季節変動性についてまとめている。これまでの時系列の観測で現れている大きなフラックスには、ケイ藻類の沈降の他、渦鞭毛藻類や円石藻類ブルームによるもの、フェーカルペレットによるものなどが見つかっている。それぞれによって、沈降速度も異なり、ケイ藻類

の凝集やフェーカルペレットによる沈降は、渦鞭毛藻類や円石藻類ブルームの沈降粒子に比べ、急速に沈降していたとしている。沈降速度が速ければ、それだけ粒子が海底に到達する確率も多くなり、表層水中から除去される炭素も増加する。沈降様式、沈降速度の違いは、海洋物質循環にとって、重要な問題である。

本研究の結果からは、植物プランクトンブルームにともなう沈降粒子（南極ブライド湾、西部北太平洋）には、ケイ藻類の凝集による沈降が示唆された。高生産域での春季ブルームには、「マリンスノー」のような粒子が、生物分解の程度が低いまま沈降している、もしくは急速な沈降をしていることが考えられる。また、ブルーム期以外の沈降粒子の脂肪酸にはケイ藻に近い組成が見られず、ブルーム期と通常期の沈降粒子は明らかに質の異なるものである。今後は沈降粒子のフラックスを評価していく上で、スプリングブルーム期に現れる大きなフラックスは、他の時期のフラックスと区別して評価していく必要がある。その意味において、沈降粒子脂肪酸組成は、沈降粒子有機物を質的に区別するための有効な手段であるといえる。

4. ベントス（底生生物）と沈降粒子

植物プランクトンブルーム期の沈降粒子有機物の特徴は、海洋の生態系にとっても重要である。ブルーム期の沈降粒子は、生体組成に近いことから、ベントス（底生生物）にとって、重要な飼料となりうることである。Handa et al. (1992)は、先の南極ブライド湾の沈降粒子のアミノ酸について分析し、その必須アミノ酸量を計算している。その結果、付近の海域の懸濁粒子や海底堆積物に比べ、沈降粒子の必須アミノ酸量は多いことから、ベントスにとっての貴重な栄養源であるとしている。

脂肪酸についても同様のことがいえる。動物は、体内で飽和脂肪酸や一不飽和脂肪酸よりリノール酸、リノレン酸を合成できない。動物は、油脂を全く摂取しないと栄養障害を起こし、それらの脂肪酸やアラキドン酸を与えることで回復する。したがって、それらの脂肪酸は必須脂肪酸と呼ばれる（鹿山、1981）。先の南極ブライド湾沈降粒子には、この多不飽和脂肪酸が4.1-16.7%存在したのに対し、南極海フェーカルペレット中には、一般的に多不飽和脂肪酸は極めて少ないと報告されている（Tanoue et al., 1982）。よって、ベントスの栄養源として、ブルーム期の沈降

粒子は重要といえる。深層の生物循環とブルーム期の沈降粒子は、積極的な関わりがあると考えられ、その分野での検証を期待したい。

5. 今後の課題

本研究の結果、不飽和脂肪酸の割合より沈降粒子の季節変動のうち、プランクトンブルーム期の粒子を明確に区別することができた。今後、脂肪酸指標をさらに有効なものにしていくためには、フェーカルペレットの脂肪酸、バクテリアによる脂肪酸の変質などを検討していくことが必要である。それにより、ブルーム期以外の沈降粒子の特徴を評価しうられる。また、脂肪酸に限らず、他の指標性有機物の開発も、海洋有機物の動態を考察する上で有効なものとなろう。

これまでも述べてきたように、セジメントトラップを用いた沈降粒子フラックスの観測には、まだ問題点が多く残されており、これらを解決していくことが、沈降粒子フラックス、生物ポンプの役割を評価する上で先決である。また、本研究の結果から、沈降粒子の季節変動について、植物プランクトンブルーム期の沈降粒子有機物が他の時期の粒子と質的に異なるものであり、沈降形態の違い、沈降速度の違いによるものであることを指摘している。マリンスノーによる沈降とフェーカルペレットによる沈降では、沈降にともなうフラックスの減少、表層水、深層水での炭素の循環との関わりなどが異なることが考えられ、それぞれの事象による物質循環を考えるべきである。そのためには、生物現象を押さえた上での現場海洋での観測、実験室内でや疑似現場海洋での試験が、今後の課題といえる。

謝 辞

1993年のカナダ、バンクーバー島サーニッチ入江での海洋メソコズム実験では、共同観測を行ったInstitute of Ocean SciencesのC. S. Wong博士、W. K. Johnson氏、他研究所の方々、東京大学の高橋正征教授に援助いただいた。光学、蛍光顕微鏡によるメソコズム内の植物プランクトンの同定及び細胞数の計測は、川延京子氏に行っていた。南極ブライド湾のセジメントトラップ実験では、国立極地研究所の福地光男博士に沈降粒子の電顕写真を提供していただいた。以上の方々に深く感謝の意を表します。

最後に、本研究を進めるにあたり、御指導と御鞭撻を頂いた名古屋大学大気水圏科学研究所の半田暢彦教授をはじめとする多くの方々に厚く感謝の意を表します。

文献

- Ackman, R. G., Jangaard, P. M., Hoyle, R. J. and Brockerhoff, H. (1964): Origin of marine fatty acids. I. Analyses of the fatty acids produced by the diatom *Skeletonema costatum*. *J. Fish. Res. Bd. Canada*, **21**, 747-756.
- Ackman, R. G., Tocher, C. S. and McLachlan, J. (1968): Marine phytoplankter fatty acids. *J. Fish. Res. Bd. Canada*, **25**, 1603-1620.
- Ackman, R. G. (1989): Fatty acids. In "Marine Biogenic Lipids, Fats, and Oils. Vol. I." (Ackman, R. G., ed.) CRC Press, Florida, p103-138.
- Arao, T., Kawaguchi, A. and Yamada, M. (1987): Positional distribution of fatty acids in lipids of the marine diatom *Phaeodactylum tricornutum*. *Phytochem.*, **26**, 2573-2576.
- Betzer, P. R., Shower, W. J., Laws, E. A., Winn, C. D., DiTullio, G. R. and Kroopnick, P. M. (1984): Primary productivity and particle fluxes on a transect of the equator at 153°W in the Pacific Ocean. *Deep-Sea Res.*, **31**, 1-11.
- Bligh, E. G. and Dyer, W. J. (1959): A rapid method of total lipid extraction and purification. *Can. J. Biochem. Physiol.*, **37**, 911-917.
- Bobbie, R. J. and White, D. C. (1980): Characterization of benthic microbial community structure by high resolution gas chromatography of fatty acid methyl esters. *Appl. Environ. Microbiol.*, **42**, 150-158.
- Chuecas, L. and Riley, J. P. (1969): Component fatty acids of the total lipids of some marine phytoplankton. *J. Mar. Biol. Ass. U.K.*, **49**, 97-116.
- Claustre, H., Marty, J.-C. and Cassiani, L. (1989): Intraspecific differences in the biochemical composition of a diatom during a spring bloom in Villefranche-sur-Mer Bay, Mediterranean Sea. *J. Exp. Mar. Biol. Ecol.*, **129**, 17-32.
- Cobelas, M. A. (1989): Lipids in microalgae. A review II. Environment. *Grasas y Aceites*, **40**, 213-223.
- Cobelas, M. A. and Lechado, J. Z. (1989): Lipids in microalgae. A review I. Biochemistry. *Grasas y Aceites*, **40**, 118-145.
- Cohen, Z., Vonshak, A. and Richmond, A. (1988): Effect of environmental conditions on fatty acid composition of the red alga *Porphyridium cruentum*: correlation to growth rate. *J. Phycol.*, **24**, 328-332.
- Davies, J. M. and Payne, R. (1984): Supply of organic matter to the sediment in the northern North Sea during a spring phytoplankton bloom. *Mar. Biol.*, **78**, 315-324.
- DeBaar, H. J. W., Farrington, J. W. and Wakeham, S. G. (1983): Vertical flux of fatty acids in the North Atlantic Ocean. *J. Mar. Res.*, **41**, 19-41.

- Deuser, W. G. and Ross, E. H. (1980): Seasonal change in the flux of organic carbon to the deep Sargasso Sea. *Nature*, **283**, 364-365.
- Deuser, W. G. (1986): Seasonal and interannual variations in deep-water particle fluxes in the Sargasso Sea and their relation to surface hydrography. *Deep-Sea Res.*, **33**, 225-246.
- Ducklow, H. W. and Carson, C. A. (1992): Oceanic bacterial production. In "Advance in Microbial Ecology, Vol. 12." (Marshall, K. C., ed.) Plenum Press, New York, p113-181.
- Ducklow, H. W., Hill, S. M. and Gardner, W. D. (1985): Bacterial growth and the decomposition of particulate organic carbon collected in sediment traps. *Cont. Shelf Res.*, **4**, 445-464.
- Eglington, G. and Hamilton, R. J. (1967): Leaf epicuticular waxes. *Science*, **156**, 1322-1335.
- Eppley, R. W. and Peterson, B. J. (1979): Particulate organic matter flux and planktonic new production in the deep ocean. *Nature*, **282**, 677-680.
- Folch, J., Lees, M. and Stanley, G. H. S. (1957): A simple method for the isolation and purification of total lipides from animal tissues. *J. Biol. Chem.*, **226**, 497-509.
- Fowler, S. W. and Knauer, G. A. (1986): Role of large particles in the transport of elements and organic compounds through the organic water column. *Prog. Oceanog.*, **16**, 147-194.
- Fukuchi, M., Hattori, H., Sasaki, H. and Hoshiai, T. (1988): A phytoplankton bloom and associated processes observed with a long-term moored system in antarctic waters. *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, **45**, 279-288.
- Gardner, W. D. (1977): Incomplete extraction of rapidly settling particles from water samplers. *Limnol. Oceanogr.*, **22**, 764-768.
- Gardner, W. D., Hinga, K. R. and Marra, J. (1983): Observations on the degradation of biogenic material in the deep ocean with implications on accuracy of sediment trap fluxes. *J. Mar. Res.*, **41**, 195-214.
- Gillan, F. T., Johns, R. B., Verheyen, T. V., Nichols, P. D., Esdaile, R. J. and Bavor Jr, H. J. (1983): Monounsaturated fatty acids as specific bacterial markers in marine sediments. In "Advance in Organic Geochemistry." (M. Bjorøy et al., ed.), John Wiley and Sons, Chichester, p198-206.
- Hama, T., Handa, N., Takahashi, M., Whitney, F. and Wong, C. S. (1988): Change in distribution patterns of photosynthetically incorporated C during phytoplankton bloom in controlled experimental ecosystem. *J. Exp. Mar. Biol. Ecol.*, **120**, 39-56.
- Handa, N. (1991): Chemical studies on organic matter and carbon cycle in the ocean. *J. Oceanogr. Soc. Japan*, **47**, 49-61.
- 半田暢彦、中塚武、伊藤雅彦 (1989): 北西部北太平洋、NNWP-01における有機物の鉛直輸送の特徴、日本海洋学会秋季大会講演要旨集、p232.

- Handa, N., Nakatsuka, T., Fukuchi, M., Hattori, H. and Hoshiai, T. (1992): Vertical fluxes and ecological significance of organic materials during the phytoplankton bloom during austral summer in Bried Bay, Antarctica. *Mar. Biol.*, **112**, 469-478.
- Hargrave, B. T. and Taguchi, S. (1978): Origin of deposited material sedimented in a marine bay. *J. Fish Res. Board. Can.*, **35**, 1604-1613.
- Harvey, H. R., Eglinton, G., O'Hara, S. C. M. and Corner, E. D. S. (1987): Biotransformation and assimilation of dietary lipids by *Calanus* feeding on a dinoflagellates. *Geochim. Cosmochim. Acta*, **51**, 3031-3040.
- 早川和秀、半田暢彦、原田晃 (1995): 中部北太平洋における沈降粒子中の生物指標性有機物の季節変動、日本地球化学会年会講演要旨集、p265.
- Hecky, R. E., Mopper, K., Kilham, P. and Degens, E. T. (1973): The amino acid and sugar composition of diatom cell-wall. *Mar. Biol.*, **19**, 323-331.
- Honjo, S. (1976): Coccoliths: production, transportation and sedimentation. *Mar. Micropaleo*, **1**, 65-79.
- Honjo, S. (1982): Seasonality and interaction of biogenic and lithogenic particulate flux at the Panama Basin. *Science*, **218**, 883-884.
- Honjo, S., Manganini, S. J. and Wefer, G. (1988): Annual particle flux and a winter outburst of sedimentation in the northern Norwegian Sea. *Deep-Sea Res.*, **35**, 1223-1234.
- Honjo, S. and Manganini, S. J. (1993): Annual biogenic particle fluxes to the interior of the North Atlantic Ocean; studied at 34°N 21°W and 48°N 21°W. *Deep-sea Res.*, **40**, 587-607.
- 生田直子 (1991): 高緯度海域における沈降粒子の炭化水素について、修士論文、名古屋大学.
- Ittekkot, V., Deuser, W. G. and Degens, E. T. (1984): Seasonality in the fluxes of sugars, amino acids, and amino sugars to the deep ocean: Sargasso Sea. *Deep-sea Res.*, **31**, 1057-1069.
- Jeffries, H. P. (1970): Seasonal composition of temperate plankton communities: fatty acids. *Limnol. Oceanogr.*, **15**, 419-426.
- Joseph, J. D. (1989): Distribution and composition of lipids in marine invertebrates. In "Marine Biogenic Lipids, Fats, and Oils. Vol. II." (Ackman, R. G., ed.) CRC Press, Florida, p49-144.
- Kates, M. and Volcani, B. E. (1966): Lipid components of diatoms. *Biochim. Biophys. Acta*, **116**, 264-278.

- Kattner, G., Gercken, G. and Eberlein, K. (1983): Development of lipids during a spring plankton bloom in the northern North Sea. I. Particulate fatty acids. *Mar. Chem.*, **14**, 149-162.
- Kattner, G. and Brockmann, U. H. (1990): Particulate and dissolved fatty acids in an enclosure containing a unialgal *Skeletomena costatum* (Greve.) Cleve culture. *J. Exp. Mar. Biol. Ecol.*, **141**, 1-13.
- 鹿山光 (1981): 必須脂肪酸、" 総合脂質科学" (鹿山光編)、恒星社厚生閣、p267-293.
- Kayama, M., Araki, S. and Sato, S. (1989): Lipids of marine plants. In "Marine Biogenic Lipids, Fats, and Oils. Vol. II." (Ackman, R. G., ed.) CRC Press, Florida, p3-48.
- Knauer, G. and Asper, V. (1989): Sediment trap technology and sampling. In "Report of the U.S. GOFS Working Group on Sediment trap Technology and Sampling."
- Knox, G. A. (1990): Primary production and consumption in McMurdo sound, Antarctica. In "Antarctic Ecosystems. Ecological Change and Conservation." (Kerry, K. R. and G. Hempel, ed.) Springer-Verlag, Berlin, p115-128.
- Kogure, K. and Koike, I. (1987): Particle counter determination of bacterial biomass in seawater. *Appl. Environ. Microbiol.*, **53**, 274-277.
- Lee, C. and Cronin, C. (1984): Particulate amino acids in the sea: Effects of primary productivity and biological decomposition. *J. Mar. Res.*, **42**, 1075-1097.
- Lee, C., Wakeham, S. G. and Farrington, J. W. (1983): Variations in the composition of particulate organic matter in a time-series sediment trap. *Mar. Chem.*, **13**, 181-194.
- Lee, C., Wakeham, S. G. and Hedges, J. I. (1988): The measurement of oceanic particle flux-are "swimmers" a problem? *Oceanography*, **2**, 34-36.
- Lerman, A., Lal, D. and Decay, M. F. (1974): Stocks settling and chemical reactivity of suspended particles in natural waters. In "Suspended solid in sea water" (Gibbs, R. J., ed.) Plenum Press, New York and London, p17-47.
- Liebezeit, G. (1985): Residual amino acid fluxes in the upper water column of the Bransfield Strait. *Oceanol. Acta*, **8**, 59-65.
- Liebezeit, G. and Bodungen, B. V. (1987): Biogenic fluxes in the Bransfield Strait: planktonic versus macroalgal sources. *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, **36**, 23-32.
- Lohrenz, S. E., Knauer, G. A., Asper, V. L., Tuel, M., Michaels, A. F. and Knap, A. H. (1992): Seasonal variability in primary production and particle flux in the northwestern Sargasso Sea: U.S. JGOFS Bermuda Atlantic Time-series Study. *Deep-Sea Res.*, **39**, 1373-1391.

- Matsuda, O., Ishikawa, S. and Kawaguchi, K. (1990): Seasonal variation of particulate organic matter under the Antarctic fast ice and its importance to benthic life. In "Antarctic Ecosystems. Ecological Change and Conservation." (Kerry K. R. and Hempel, G., ed.) Springer-Verlag, Berlin, p143-148.
- 松枝秀和 (1986): 海洋の物質循環における大型粒子の役割に関する研究、学位論文、名古屋大学
- Matsueda, H., Handa, N., Inoue, I. and Takano, H. (1986): Ecological significance of salp fecal pellets collected by sediment traps in the eastern North Pacific. *Mar. Biol.*, **91**, 421-431.
- Mayzaud, P., Chanut, J. P. and Ackman, R. G. (1989): Seasonal changes of the biochemical composition of marine particulate matter with special reference to fatty acids and sterols. *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, **56**, 189-204.
- Mayzaud, P., Claustre, H. and Augier, P. (1990). Effect of variable nutrient supply on fatty acid composition of phytoplankton grown in an enclosed experimental ecosystem. *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, **60**, 123-140.
- McCave, I. N. (1975): Vertical flux of particles in the ocean. *Deep-Sea Res.*, **22**, 491-502.
- Morris, R. J. (1984): Studies of a spring phytoplankton bloom in an enclosed experimental ecosystem. II. Changes in the component fatty acids and sterols. *J. Exp. Mar. Biol. Ecol.*, **75**, 59-70.
- Morris, R. J. and Culkin, F. (1976): Marine lipids: Analytical techniques and fatty acid ester analyses. *Oceanogr Mar. Biol. Ann. Rev.*, **14**, 391-433.
- Morris, R. J., McCartney, M. J., Joint, I. R. and Robinson, G. A. (1985): Further studies of a spring phytoplankton bloom in an enclosed experimental ecosystem. *J. Exp. Mar. Biol. Ecol.*, **86**, 151-170.
- Mortensen, S. H., Børsheim, K. Y., Rainuzzo, J. R. and Knutsen, G. (1988): Fatty acid and elemental composition of the marine diatom *Chaetoceros fragilis* Schütt Effects of silicate deprivation, temperature and light intensity. *J. Exp. Mar. Biol. Ecol.*, **122**, 173-185.
- Nakatsuka, T., Handa, N., Wada, E. and Wong, C. S. (1992): The dynamic changes of stable isotopic ratios of carbon and nitrogen in suspended and sedimented particulate organic matter during a phytoplankton bloom. *J. Mar. Res.*, **50**, 267-296.
- Nichols, D. S., Nichols, P. D. and Sullivan, C. W. (1993): Fatty acid, sterol and hydrocarbon composition of Antarctic sea ice diatom communities during the spring bloom in McMurdo Sound. *Antarctic Sci.*, **5**, 271-278.

- Noriki, S. and Tsunogai, S. (1986): Sediment trap comparison experiments. Existence of light particles collected in the narrow sediment traps. *J. Oceanogr. Soc. Japan*, **42**, 119-123.
- O'Leary, M. H. (1981): Carbon isotope fractionation in plants. *Phytochem.*, **20**, 553-567.
- Opote, F. I. (1974): Lipid and fatty-acid composition of diatoms. *J. Exp. Botany*, **25**, 823-835.
- Pace, M. L., Knauer, G. A., Karl, D. M. and Martin, J. H. (1987): Primary production, new production and vertical flux in the eastern Pacific Ocean. *Nature*, **325**, 803-804.
- Perry, G. J., Volkman, J. K., Johns, R. B. and Bavor Jr, H. J. (1979): Fatty acids of bacterial origin in contemporary marine sediments. *Geochim. Cosmochim. Acta*, **43**, 1715-1725.
- Pohl, P. and Zurheide, F. (1979): Fatty acids and lipids of marine algae and the control of their biosynthesis by environmental factors. In "Marine Algae in Pharmaceutical Science." (Hoppe, H. A., Levring, T. and Tanaka, Y., ed.) Walter de Gruyter, Berlin, New York, p473-523.
- Quemeneur, M. and Marty, Y. (1992): Sewage influence in a macrotidal estuary: Fatty acid and sterol distribution. *Estuarine Coastal Shelf Sci.*, **34**, 347-363.
- Raymont, J. E. G. (1980): The algae of the phytoplankton. In "Plankton and Productivity in the Ocean. Vol. 1 Phytoplankton." Pergamon Press, Oxford, p65-132.
- Reemtsma, T., Haake, B., Ittekkot, V., Nair, R. and Brockmann, U. H. (1990): Downward flux of particulate fatty acids in the central Arabian Sea. *Mar. Chem.*, **29**, 183-202.
- Reemtsma, T. and Ittekkot, V. (1992). Determination of factors controlling the fatty acid composition of settling particles in the water column by principal-component analysis and their quantitative assessment by multiple regression. *Org. Geochem.*, **18**, 121-129.
- Riebesell, U. (1989). Comparison of sinking and sedimentation rate measurements in a diatom winter/spring bloom. *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, **54**, 109-119.
- Schultz, D. M. and Quinn, J. G. (1973): Fatty acid composition of organic detritus from *Spartina alterniflora*. *Estuarine Coastal Mar. Sci.*, **1**, 177-190.
- Schultz, D. M. and Quinn, J. G. (1977). Suspended material in Narragansett Bay: fatty acid and hydrocarbon composition. *Org. Geochem.*, **1**, 27-36.
- Shanks, A. L. and Trent, J. D. (1980): Marine snow: sinking rates and potential role in vertical flux. *Deep-Sea Res.*, **27**, 137-143.
- Sicre, M. A., Paillasseur, J. L., Marty, J. C. and Saliot, A. (1988): Characterization of seawater samples using chemometric methods applied to biomarker fatty acids. *Org. Geochem.*, **12**, 281-288.
- Smayda, T. J. (1970): The suspension and sinking of phytoplankton in the sea. *Oceanogr. Mar. Biol. Ann. Rev.*, **8**, 353-414.

- Smetacek, V., Von Bröckel, K., Zeitzschel, B. and Zenk, W. (1978): Sedimentation of particulate matter during a phytoplakton spring bloom in relation to the hydrographical regime. *Mar. Biol.*, **47**, 211-226.
- Smetacek, V. S. (1985): Role of sinking in diatom life-history cycles: ecological, evolutionary and geological significance. *Mar. Biol.*, **84**, 239-251.
- Smith, D. J., Eglinton, G. and Morris, R. J. (1983): Interfacial sediment and assessment of organic input from a highly productive water column. *Nature*, **304**, 259-262.
- Strathmann, R. R. (1967): Estimating the organic carbon content of phytoplakton from cell volume. *Limnol. Oceanogr.*, **12**, 411-418.
- Suess, E. (1980): Particulate organic carbon flux in the oceans-surface productivity and oxygen utilization. *Nature*, **288**, 260-263.
- Tanoue, E. and Handa, N. (1980): Vertical transport of organic materials in the northern North Pacific as determined by sediment trap experiment. Part 1. Fatty acid composition. *J. Oceanogr. Soc. Japan*, **36**, 231-245.
- Tanoue, E., Handa, N. and Sakugawa, H. (1982): Difference of the chemical composition of organic matter between fecal pellet of *Euphausia superba* and its feed, *Dunaliella tertiolecta*. *Trans. Tokyo Univ. Fish.*, **5**, 189-196.
- Turpin, D. H. and Harrison, P. J. (1979): Limiting nutrient patchiness and its role in phytoplankton ecology, *J. Exp. mar. Biol. Ecol.*, **39**, 151-166.
- Vinogradov, M. E., Menshutkin, V. V. and Shushkina, E. A. (1972): On mathematical simulation of a pelagic ecosystem in tropical waters of the ocean. *Mar. Biol.*, **16**, 261-268.
- Volkman, J. K., Johns, R. B., Gillan, F. T., Perry, G. J. and Bavor Jr, H. J. (1980): Microbial lipids of an intertidal sediment-I. Fatty acids and hydrocarbons. *Geochim. Cosmochim. Acta*, **44**, 1133-1143.
- Volkman, J. K., Jeffrey, S. W., Nichols, P. D., Rogers, G. I. and Garland, C. D. (1989): Fatty acid and lipid composition of 10 species of microalgae used in mariculture. *J. Exp. Mar. Biol. Ecol.*, **128**, 219-240.
- Wakeham, S. G., Lee, C., Farrington, J. W. and Gagosian, R. (1984): Biogeochemistry of particulate organic matter in the oceans: results from sediment trap experiments. *Deep-Sea Res.*, **31**, 509-528.
- Wakeham, S. G. and Lee, C. (1989): Production, transport, and alteration of particulate organic matter in the marine water column. In "Organic Geochemistry. Principles and Applications." (Engel, M. H. and Macko, S. A., ed.) Plenum Press, New York and London, p145-169.

- Wakeham, S. G. and Lee, C. (1993): Organic geochemistry of particulate matter in the ocean: The role of particles in oceanic sedimentary cycles. *Org. Geochem.*, **14**, 83-96.
- Wefer, G. (1990): Particle flux in the ocean: effect of episodic production. In "Productivity of the Ocean: Present and Past." (Berger, W. H., Smetacek, V. S. and Wefer, G., ed.) John Wiley and Sons, Chichester, p139-154.
- Wefer, G., Fischer, G., Fötterer, D. and Gersonde, R. (1988): Seasonal particle flux in the Bransfield Strait, Antarctica. *Deep-Sea Res.*, **35**, 891-898.
- Wiebe, P. H., Boyed, S. H. and Winget, C. (1976): Particulate matter sinking to the deep-sea floor at 2000 m in the Tongue of the Ocean, Bahama, with a description of a new sedimentation trap. *J. Mar. Res.*, **34**, 341-354.

副論文

1. Changes in the composition of fatty acids in sinking matter during a diatom bloom in a controlled experimental ecosystem.
K. Hayakawa, N. Handa and C. S. Wong
J. Exp. Mar. Biol. Ecol., in press. (1996)
(実験閉鎖系内のケイ藻ブルーム中の沈降粒子の脂肪酸の変化)
2. Factors controlling the temporal variation of fatty acids in particulate matter during a phytoplakton bloom in a marine mesocosm.
K. Hayakawa, N. Handa, K. Kawanobe and C. S. Wong
Mar. Chem., in press. (1996)
(海洋メソコズム内の植物プランクトンブルームにともなう懸濁粒子中の脂肪酸の時系列変化を支配する要因)
3. Downward fluxes of fatty acids and hydrocarbons during a phytoplankton bloom in the austral summer in Breid Bay, Antarctica.
K. Hayakawa, N. Handa, N. Ikuta and M. Fukuchi
Org. Geochem., accepted. (1996)
(南極ブライド湾における夏の植物プランクトンブルーム中の脂肪酸と炭化水素の沈降フラックス)

参考論文

1. Conversion of oleic acid to monocarboxylic acids and γ -lactones by laboratory heating experiments in relation to organic diagenesis.
A. Shimoyama, K. Hayakawa and K. Harada
Geochem. J. 27, 59-70. (1993)
(有機続成作用に関する実験室内の加熱実験によるオレイン酸からモノカルボン酸と γ -ラクトンへの変成)
2. Temporal variation of fatty acids in polar lipids and triglycerides of particulate matter in a controlled experimental ecosystem.
K. Hayakawa, N. Handa and C. S. Wong
Res. Org. Geochem., 10, 11-15. (1995) (in Japanese)
(海洋実験生態系における懸濁粒子の脂肪酸組成の変動)