

# 植物プランクトン群集組成の変化とその化学的要因

大気海洋圏環境科学専攻 化学物質循環講座  
博士課程3年 前田巨宏(指導教官 乗木新一郎)

## 背景

海洋は、大気中二酸化炭素の除去源として重要である。海洋の植物プランクトンの多くは、ケイ酸塩殻生物と炭酸塩殻生物である。これらの植物プランクトンは光合成をして、炭素を海洋深層へと運び、海洋表層の二酸化炭素分圧を減少させる。しかしながら、炭酸塩殻形成はケイ酸塩殻形成の場合とは逆に、表層海水中のアルカリ度を減少させ、海洋から二酸化炭素を大気へ放出させる。このため、ケイ酸塩殻 (Opal) 生物と炭酸塩殻 ( $\text{CaCO}_3$ ) 生物の量と比を時空間的に定量化することは地球温暖化を把握するためには重要である。近年、大西洋では Opal/ $\text{CaCO}_3$  比の減少が報告されている(Deuser et al., 1995; Antia et al., 2001)。Deuser et al. (1995) は、サルガッソー海で、過去 10 年強のセジメントトラップ実験を行い、その結果から、Opal フラックスの減少と、それに起因する Opal/ $\text{CaCO}_3$  比の減少を報告している。残念ながら、高生産海域であり、高い Opal/ $\text{CaCO}_3$  比が報告されている、西部北太平洋ではそのような研究結果はほとんどない。

本研究海域は基礎生産の高い海域で、珪藻類が優占的な海域である(e.g. Taniguchi, 1999)。その結果、沈降粒子中の Opal/ $\text{CaCO}_3$  比は非常に高い。よって、Opal/ $\text{CaCO}_3$  比を研究する上で非常に有用な海域である。

大陸棚斜面を通した、粒状炭素やその他の生物起源粒子の輸送は海洋の炭素、栄養塩循環の重要なプロセスであると考えられている(Walsh et al., 1981; Biscaye et al., 1988)。本研究海域は海溝斜面と海溝部を有している。過去の研究から、本研究海域では、大陸棚斜面から海溝へ、また海溝を越えた外洋域まで、粒子が輸送されていると報告されている(Otosaka and Noriki, 2000; Otosaka et al., 2004)。しかしながら、それらの研究では、対象は有機炭素粒子や鉱物粒子であり、その他の(海水中での動態が異なるような)生物起源粒子、特に、Opal や  $\text{CaCO}_3$  の横方向からの寄与を見積もった例は無い。そこで、本研究海域で Opal 粒子と  $\text{CaCO}_3$  粒子の動きを知るためには、横方向からの寄与を明らかにする必要がある。

堆積物の分野では粒径分布の研究はよくされている。その結果、堆積物の粒径分布はモードを多数持つことが明らかになっている。それは現在、粒子の輸送過程や沈積過程を反映していると考えられている。本研究海域は、粒子の供給源は、少なくとも、2 つあるだろう。1 つ目は表層から、ほとんど時間をかけずに沈降してくる粒子。2 つ目は横方向から水と共に時間をかけて、運ばれてきた粒子である。鉱物の粒径分布はこの輸送過程の違いを反映したデータになると考え、本研究では粒径分布を測定した。海水中沈降粒子試料は、その量の少なから、粒径分布を測定した例は少ない。その意味でも本研究のデータは重要となる。

そこで本研究では、西部北太平洋において、セジメントトラップを用いて、表層から深層への Opal と  $\text{CaCO}_3$  フラックスを正確に見積もることを目的とした。研究流れは、1) Opal と  $\text{CaCO}_3$  の正確な定量法の確立、2) 横方向からの粒子供給の指標を開発し、Opal と  $\text{CaCO}_3$  フラックスの横方向からの寄与を見積もる。最後に表層からの Opal と  $\text{CaCO}_3$  フラックスを正確に見積もるという流れで行う。1)については2003年度研究成果報告会、研究成果報告書で報告した。現在論文執筆中である。そこで、本報告書では2)について主に報告する。

## 試料

沈降粒子試料は、北緯 41 度 29 分東経 145 度 37 分の Sta.H7(水深約 7000m)と北緯 44 度東経 155 度の Sta. KNOT(水深約 5300m)にセジメントトラップ(Nichiyu HX-10, Noriki et al., 1995)を設置し採取した(Fig. 1)。セジメントトラップは Sta.H7 では約 1400m、Sta. KNOT では約 770m と約 5100m の水深に設置した。設置期間は2002/6/12 ~ 2003/5/28 である。捕集瓶は生物による分解を防ぐため、ハウ砂で中和した 10%ホルムアルデヒド溶液で満たした。セジメントトラップの設置と回収は北海道大学水産学部、練習船、おしよる丸で行った。

## 化学分析

採取した試料は、スイマーを除去した後、孔径 0.6  $\mu\text{m}$  ヌクレポアフィルター上に集め、凍結乾燥した。乾燥後、重量を測定し、全粒子束を算出した。 $\text{CaCO}_3$  クーロメーターで測定した。生物起源オパールは、Mortlock and Frölich (1989)の方法を改良し、行った(論文準備中、2004年度年度末 COE 成果報告会で報告)。陸起源粒子は過酸化水素で有機物を除去し、塩酸で炭酸塩を除去、その後、2M- $\text{Na}_2\text{CO}_3$  で Opal を除去した残渣と定義した。陸起源粒子の粒径分布はその残渣を粒度分析計で測定した。

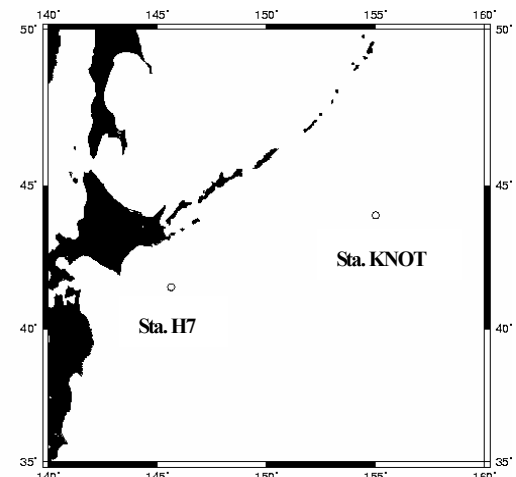


Fig. 1 試料採取地点

**結果**

Opal, CaCO<sub>3</sub>, 陸起源粒子  
フラックス

Fig. 2 は Sta. H7 と Sta. KNOT の上層トラップ(以後 Sta.KNOT(770))と Sta. KNOT 下層トラップ(以後 Sta. KNOT(5100))の Opal, CaCO<sub>3</sub>, 陸起源粒子のフラックスを示している。Sta. H7 の Opal フラックスは 2002/6/12-7/12 の期間で観測期間を通じての最大値 548.3 mg/m<sup>2</sup>/day を観測した。その後減少し、再び増加した。観測期間の平均値は 93.6 mg/m<sup>2</sup>/day であった。Sta. KNOT(770)の Opal フラックスは 2002/7/12-8/11 の期間で、最大値 68.9 mg/m<sup>2</sup>/day であった。その後減少し、春に再び増加した。平均値は 36.4 mg/m<sup>2</sup>/day であった。Sta. KNOT(5100)の Opal フラックスは 2002/6/12-7/12 の期間で、最大値 127 mg/m<sup>2</sup>/day であった。平均値は 48.5 mg/m<sup>2</sup>/day であった。また季節変動は上層のほうが大きかった。ほぼ全観測期間で Sta. KNOT(5100) が Sta.KNOT(770)よりも Opal フラックスが高かった。

Sta. H7 では、CaCO<sub>3</sub> フラックスは 2002/6/12-7/12 の期間で最大値 46.2 mg/m<sup>2</sup>/day を観測

した。その後減少した。Sta. KNOT(770)では秋季に CaCO<sub>3</sub> フラックスが高かった。平均値は 25.7 mg/m<sup>2</sup>/day であった。Sta. KNOT(5100)では、CaCO<sub>3</sub> フラックスは 2002/11/9-12/9 の観測期間で最大値 35.5 mg/m<sup>2</sup>/day を観測した。平均値は 24.5 mg/m<sup>2</sup>/day であった。CaCO<sub>3</sub> フラックスは Opal フラックスと異なり、鉛直的には増加しなかった。

Sta. H7 では陸起源粒子フラックスは 2002/6/12-7/12 と 2003/1/8-2/7 に極大値を示し、それぞれ、48.2 mg/m<sup>2</sup>/day、143.5 mg/m<sup>2</sup>/day であった。この極大値を示した期間は Opal の極大値を示した期間と一致していた。平均値は 33.4 mg/m<sup>2</sup>/day であった。Sta. KNOT(770)の陸起源粒子フラックスは Sta. H7 と比較すると、季節変動は小さく、若干 12 月に高かった。Sta. KNOT(5100)では Opal フラックスと同じような変動を示した。平均値は 14.2 mg/m<sup>2</sup>/day であった。

陸起源粒子の粒径分布と粒径別フラックス

粒径分布は 3 つのトラップ全てで、2 つピーク(体積基準最頻値)をもつ分布だった(Fig. 3)。2 つのピークはそれ

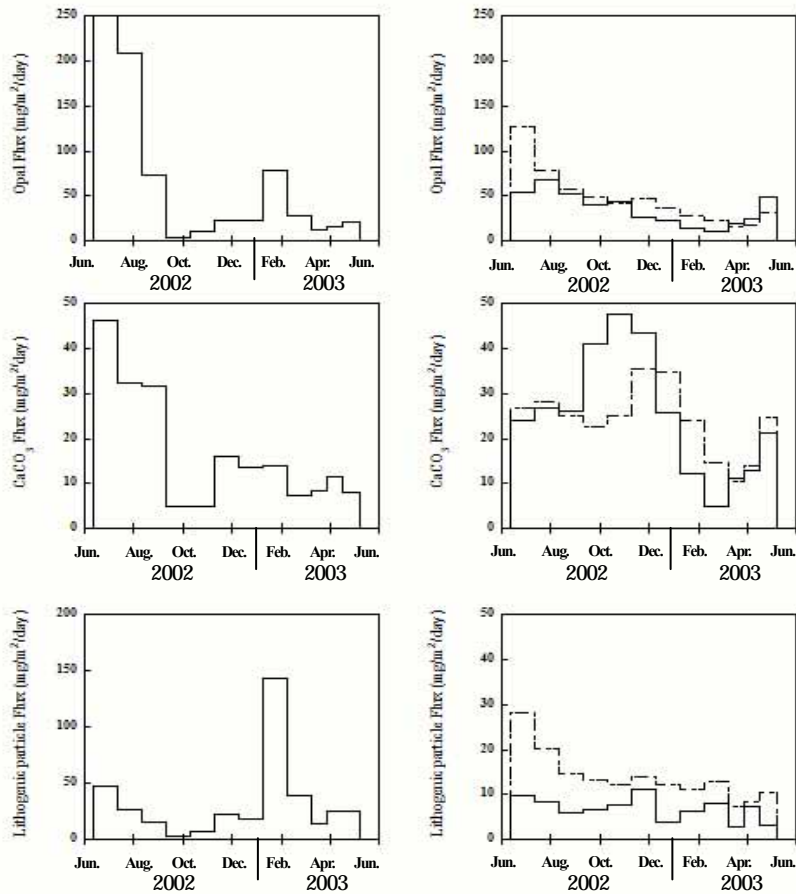


Fig. 2 Sta. H7 と Sta. KNOT の Opal, CaCO<sub>3</sub>, 陸起源粒子の時系列変化。左側は Sta.H7 の結果を示し、右側は Sta. KNOT の結果を示す。Sta. KNOT の点線は Sta. KNOT(5100)、実線は Sta. KNOT(770)の結果

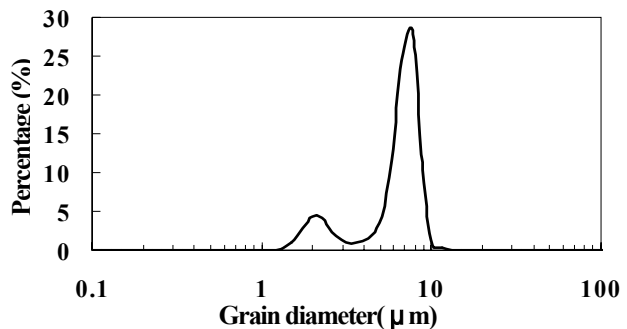


Fig. 3 陸起源粒子の粒径分布の一例 (Sta. KNOT 上層トラップ 2002/10/10-2002/11/9)

それぞれ3-4 μmと7-12 μmにピークを観測した。小さいほうのピーク粒径は季節的に変化しなかったが、大きいほうのピーク粒径は季節的に変化した。

各粒径における密度は一定と仮定し、体積基準粒径分布に陸起源粒子フラックスを乗じることで粒径別陸起源粒子フラックスを算出した。2つのピーク間で、小さいほうから一つ目の変極点で陸起源粒子を二つに分けた(小さい陸起源粒子と大きい陸起源粒子)。その結果、Sta. H7では小さい陸起源粒子フラックスが平均で18.0 mg/m<sup>2</sup>/dayで大きい陸起源粒子フラックスが平均で15.5 mg/m<sup>2</sup>/dayであった。Sta. KNOT(770)では小さい陸起源粒子フラックスと大きい陸起源粒子フラックスがそれぞれ、平均2.2 mg/m<sup>2</sup>/day、4.9 mg/m<sup>2</sup>/dayであった。Sta. KNOT(5100)では小さい陸起源粒子フラックスと大きい陸起源粒子フラックスはそれぞれ、平均9.0 mg/m<sup>2</sup>/dayと5.3 mg/m<sup>2</sup>/dayであった。Sta. KNOTにおいて鉛直的に見ると、大きい陸起源粒子は増加しなかったが、小さい陸起源粒子は増加した。

### 考察

#### Sta. H7における高い生物起源粒子フラックス

Sta. H7とSta. KNOTではOpalフラックスの平均値は93.6 mg/m<sup>2</sup>/dayと36.4 mg/m<sup>2</sup>/dayである。Sta. H7とSta. KNOTでは、冬場の表層硝酸濃度は約20 μmol/kg (Saito et al., 1998; Tsurushima et al., 2002)である。よって、Sta. H7とSta. KNOTのOpalフラックスの違いは植物プランクトンによるOpal生産によるものとは考えられない。このような海底に近いところでのセジメントトラップ実験では斜面をつたう横方向への粒子の流れ(e.g. Otosaka and Noriki, 2000)が報告されている。このことから、海溝斜面にある、Sta. H7ではSta. KNOTと比較して、横方向からの粒子が多いのかもしれない。

#### Sta. KNOTにおける陸起源粒子フラックスの鉛直変化とその粒径分布

Sta. KNOTでは、陸起源粒子フラックスは、ほぼ全期間で鉛直的に増加した。平均値では7.1 mg/m<sup>2</sup>/day増加した。Saito et al.(1992)では鉛直的に増加する陸起源粒子は、横方向からの移流によってもたらされた結論付けている。Nakatsuka et al.(1997)は同一海域でセジメントトラップ実験を行っている。彼らは、本研究海域で4785mに設置したセジメントトラップで捕集した沈降粒子の放射性炭素の結果から、再懸濁粒子の存在を指摘している。これらの結果から、本研究でも陸起源粒子フラックスの鉛直的増加は横方向からの移流によって引き起こされたと考えられる。Saito et al.(1992)では陸起源粒子の鉛直的なフラックスの関係を線形で0mに外挿すると大気からの降水量と一致することを報告している。本研究でも、Uematsu et al.(2004)の大気からの降水量(5.5 mg/m<sup>2</sup>/day)とほぼ一致した(Fig. 4)。陸起源粒子フラックスの鉛直的な増加量、すなわち横ほうから移動した量は小さい陸起源粒子によって、占められている(Fig. 4)。このことから、小さい陸起源粒子が、横方向から移動してきた粒子の指標となりえることが分かる。

本研究海域周辺堆積物の陸起源粒子の粒度分布は8 μm程度に最頻値を示している。また大気降下物の粒径分布も最頻値は7-8 μmと推測される。しかしながら、鉛直的に増加した陸起源粒子の最頻値は3-4 μmである。小さい陸起源粒子が増えた理由は大気移動速度よりも海水の移動速度のほうが遅く、沈降速度の速い粒径の大きな粒子は、海水中を移動する間に除去され、小さいものだけが運ばれてきたと考えられる。

残念ながら、Sta. H7では鉛直的なデータがない。

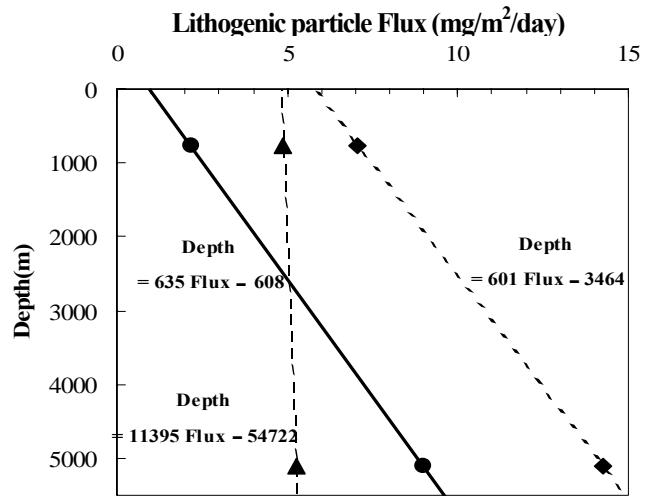


Fig. 4 陸起源粒子フラックスの鉛直変化

菱形は全陸起源粒子フラックス、丸は小さい陸起源粒子フラックス、三角は大きい陸起源粒子フラックスを示す。

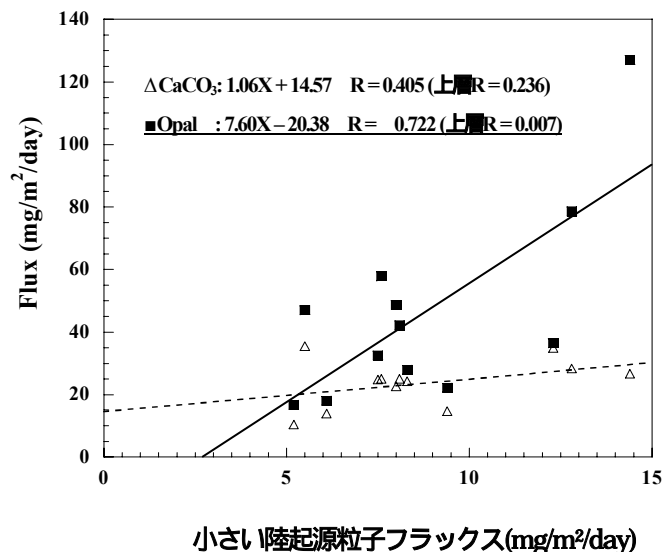


Fig. 5 Sta. KNOT 下層セジメントトラップでの小さい陸起源粒子フラックスと生物起源粒子フラックスの関係

しかしながら、Sta. H7 は海溝斜面にあり、また小さい陸起源粒子の量が多いことから、横方向から来た粒子が Sta. KNOT と比較して、多いことが想像される。

#### Sta. KNOT における小さい陸起源粒子と生物起源粒子

Sta. KNOT(770)の平均 Opal フラックスは 36.4 mg/m<sup>2</sup>/day であった。Sta. KNOT(5100)の平均オパールフラックスは 48.5 mg/m<sup>2</sup>/day と Sta. KNOT において、Opal フラックスは鉛直的に増加した。海水中で Opal は海洋表層で作られ、溶解しながら沈降する。したがって、Opal フラックスの鉛直的増加は鉛直一次的観点では説明がつかない。Fig. 5 は Sta. KNOT(5100)での小さい陸起源粒子フラックスと生物起源粒子フラックスの関係を示している。Sta. KNOT(5100)では、小さい陸起源粒子フラックスと Opal フラックスはよい相関があり、 $r = 0.722$  であった(Fig. 5)。また Opal フラックスと小さい陸起源粒子フラックスは両者とも鉛直的に増加した。これらは、Opal も小さい陸起源粒子と同様に、横方向から移流して入り込んでいることを示しているだろう。Sta. KNOT(5100)では CaCO<sub>3</sub> フラックスと小さい陸起源粒子フラックスの相関が悪かった(Fig. 5)。また CaCO<sub>3</sub> フラックスは鉛直的に増加はしていなかった。本研究海域のカルサイト溶解躍層は約 2000 m に存在する。このことから、横方向から CaCO<sub>3</sub> 粒子が移流してきても、溶解してしまったため、横方向から来た小さい陸起源粒子とは相関が悪くなったのだろう。Sta. KNOT(770)では Opal、CaCO<sub>3</sub> フラックスともに、小さい陸起源粒子フラックスと相関が無かった。このことは 2 つの理由が考えられる。一つは横方向から粒子が来ていない。2 つ目は表層からの変動によって横方向からの影響が見えにくくなっていることである。Fig. 4 から Sta. KNOT(770)でも、横方向から小さい陸起源粒子が来ていることが分かる。このことから、Sta. KNOT(770)でも横方向から粒子が来ているが、表層から来ているものが多いことが推察される。

#### 横方向から来た Opal フラックスの見積もり

本研究の最大の目的は表層からきた Opal と CaCO<sub>3</sub> フラックスの見積もりである。このためには横方向からのフラックスを除去する必要がある。そこで、本研究では、横方向から移流してきた粒子の指標として使えることが判明した、小さい陸起源粒子フラックスと Opal の関係を用いて、Sta. KNOT 上層セジメントトラップから表層からのフラックスを見積もることとする。

平均値で上層セジメントトラップに捕集された Opal フラックスは 36.4 mg/m<sup>2</sup>/day であった。この Opal 粒子は溶解のため沈降するにつれて減少する。Tsunogai et al. (1990)の式より 36.4 mg/m<sup>2</sup>/day は 5100 m のセジメントトラップに捕集されるときは

$$\text{Opal Flux}(5100\text{m}) = \text{Opal Flux}(770\text{m}) - \text{Opal Flux}(770\text{m}) \times \text{EXP}(-0.03 \times (5.1 - 0.77))$$

より 32.0 mg/m<sup>2</sup>/day となる。Sta. KNOT(5100)の Opal フラックスは 48.5 mg/m<sup>2</sup>/day であった。よって、 $48.5 - 32.0 = 16.5 \text{ mg/m}^2/\text{day}$  が横方向から入った。この時小さい陸起源粒子フラックスは 6.82 mg/m<sup>2</sup>/day 増加した。よって、横方向から来た粒子の Opal/小さい陸起源粒子比は 2.4 と算出された。この比を使って Sta. KNOT 上層セジメントトラップの表層からの Opal フラックス Fo(s) は以下の式で計算される。

$$\text{Fo}(s) = \text{Fo}(m) - 2.4 \times \text{FSI}(m)$$

ここで Fo(s) は算出される表層からの Opal フラックス、Fo(m) は測定された Opal フラックス FSI(m) は測定された小さい陸起源粒子フラックスを示す。

Fig. 6 は Sta. KNOT(770)での計算された表層と横方向からの Opal フラックスと、Opal/CaCO<sub>3</sub> 比の時系列変化を示している。バレルの Opal フラックスと計算された表層からの Opal フラックス

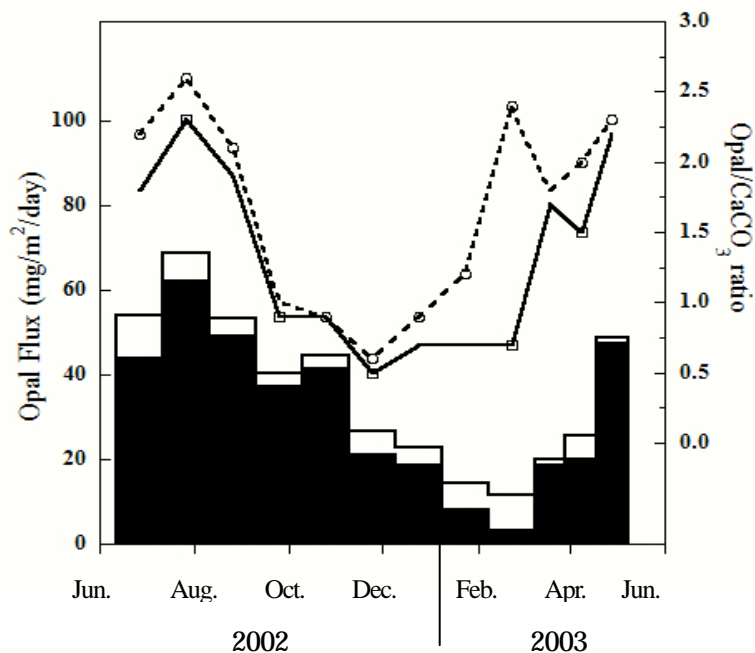


Fig. 6 Opal フラックスと Opal/CaCO<sub>3</sub> 比の時系列変化

黒棒は計算された表層からの Opal フラックスを示し、白棒はバレルの Opal フラックスを示す。また実線は計算された表層からの Opal/CaCO<sub>3</sub> 比を示し、点線はバレル Opal/CaCO<sub>3</sub> 比を示す。

の季節変動はほぼ同じで、6月から8月にかけて高い値であった。平均 Opal フラックスはバルクで 36.4 mg/m<sup>2</sup>/day であったが、本方法では 31.2 mg/m<sup>2</sup>/day となった。従来の方法では、平均 14% 過大見積りをしていて、従来の方法では、Opal フラックスは冬季(1-3月)に、最大 350% の過大見積りをしていて、Nakatsuka et al. (1997) は本研究海域でセジメントトラップ実験を行い、冬季に、再懸濁した有機炭素が多いこと報告している。本研究も同様に、冬季に横方向からの粒子の影響が大きかった。従来のバルク法と本法の間で Opal/CaCO<sub>3</sub> 比は冬季に著しく異なっていた。平均 Opal/CaCO<sub>3</sub> 比は従来の方法で 1.4、本方法では 1.2 であった。この両者の値は過去の研究の値よりも低い。本研究海域は 5 月から 6 月にかけて、春季珪藻ブルームが報告されている。本研究では、セジメントトラップによる沈降粒子の捕集は 6 月中旬から行った。この結果、春季の珪藻ブルームを逃している可能性がある。実際本研究でも、2003 年には 3 月以降 Opal フラックスが増加してきている。Opal フラックスは、2003 年 5 月には 2002 年の 6 月よりも高い値が観測されている。2002 年にはこの春季の珪藻の増加をとり逃したため、過去の研究より、Opal フラックスが少なかったのだろう。本研究海域と他海域とのセジメントトラップで観測された Opal/CaCO<sub>3</sub> 比の比較を行った。その結果は西部北太平洋が南極海、ベーリング海、オホーツク海について高い海域であった。北西部北太平洋では Opal/CaCO<sub>3</sub> 比が 3 以上の観測値が多く、北東部北太平洋の Station P で 1 程度であり、その他の海域ではほとんど 1 以下であった。本研究の結果(14% 過大見積)を考慮しても、本研究海域はやはり、高い Opal/CaCO<sub>3</sub> 比を示す海域であろう。

#### 算出された Opal/小さい陸起源粒子比の評価

本研究海域の水深 1000 m 付近の海流は南西から北東に向かって流れている。本研究海域の上流で、堆積物の Opal と陸起源粒子の比はおおよそ 0.3 である(Otosaka unpublished data)。今回算出された横方向からの Opal/小さい陸起源粒子の比は 2.4 であり、一見矛盾した結果に見える。しかしこれは海底を輸送されてくる間に、大きな陸起源粒子が除去されたと考えれば、説明がつく。算出された 2.4 という値は平均値であり、季節的に変動する可能性がある。なぜなら、上述のように、この比は流されてくる時間によって、変化する可能性があるからである。深層の海水の流動とそれに伴う粒子輸送の研究が進むと、詳細が判明するだろう。よって本見積もりは、時期によっては過小評価もしくは過大評価している可能性があるが、観測期間を通じての平均値では少なくとも、問題は無いと考える。

セジメントトラップは海水中を沈降する粒子フラックスを直接測定する有用な道具である。しかしながら、現在セジメントトラップの捕集効率の問題がある。Yu et al., (2001) は、セジメントトラップに観測された <sup>230</sup>Th と <sup>231</sup>Pa フラックスを用いて、捕集効率の研究を行った。その結果、設置深度が深い場合は捕集効率が 1 に近くなるが、設置深度が浅い場合は、セジメントトラップの捕集効率がしばしば 0.4 を切ることを報告している。しかしながら、各成分間(Opal や CaCO<sub>3</sub> 等)では捕集効率の違いは認められていない(Scholten et al., 2001)。よって、本研究でも、Opal フラックスや、CaCO<sub>3</sub> フラックスの絶対値は問題があるかもしれないが、Opal/CaCO<sub>3</sub> 比は問題がない。Sta. KNOT(770)は Opal/小さい陸起源比は 16.8 で Sta. KNOT(5100)は Opal/小さい陸起源比は 5.4 である。この比の鉛直的減少は Opal の溶解では説明がつかない。よって、Sta. KNOT(5100)が Sta. KNOT(770)と横方向からの粒子の混合と考えれば、横方向から運ばれてきた粒子の Opal/小さい陸起源比は 5.4 よりも小さくなくてはならない。よって、本研究で求めた 2.4 という値は適当であるといえる。

#### まとめと結論

陸起源粒子の粒径分布が再懸濁粒子の指標となりえることが分かった。その結果、大陸棚斜面から遠い Sta. KNOT の 770m のセジメントトラップでさえ横方向から粒子が運ばれていた。今まで本研究海域では研究例がほとんど無い Opal の横方向からの寄与を見積もった。その結果観測期間中の平均値で Opal の 14% が横方向から運ばれていた。横方向からの寄与は冬季に一番大きかった。