

陸起源粒子の外洋域への輸送過程

乗木新一郎

1. はじめに

海洋における物質循環にとって、海洋表層の生物生産力は重要な要素である。高い生産性の海域では、表層から深層へ大量の粒子が運ばれており、化学物質の活発な除去が行われている（例えば、Noriki and Tsunogai, 1986; Lampitt and Antia, 1997）。物質循環にとって、もう一つの重要な事柄は、浅海域から深海域への粒子の水平移動である。最近、このことに多くの注目が集まっている。いろいろな研究手段があるが、セジメントトラップ実験は移動する粒子を直接捕らえて研究する点で優れた手法の一つである。そして、陸棚斜面（Biscaye et al., 1988）や、内湾から外洋への（例えば、Yanagi et al., 1995 ; Noriki et al., 1997）物質移動の機構がセジメントトラップ実験によって研究され、議論され始めた。

西部北太平洋は、物質循環にとって最も重要な海域の一つである、なぜならば、春季のケイ藻の増殖があり、生物生産が高い海域であるからである（Shiomoto et al., 1994）。

西部北太平洋のもう一つの特徴は、この海域には、日本列島を含むアジア大陸から、多くの陸起源粒子が、河川や大気圏を通して運ばれることである。そして、北部日本海溝周辺海域では、これらの物質が一旦堆積するが、冬季の海水鉛直混合によって、再懸濁して、大陸斜面を深海へ移動し

ている可能性がある。

ここでは、セジメントトラップで捕捉された粒子について、特に陸起源粒子の鉛直的、水平的変動について西部北太平洋と日本海溝域を中心にして概観する。

2. セジメントトラップ実験

海中を沈降する粒子を捕捉する道具をセジメントトラップと呼んでいる。形状や機能は研究者がそれぞれ工夫している。外洋で一般的に用いられているものは、高さ約1mほどのロート形であり、直径50 cmから1m程度の円形の開口部には蜂の巣状のバツフルがついている。いくつかの試料捕集瓶が備えられており、タイマーで任意の期間の試料が分取できる。

タイマー等の制御部は耐圧容器に入っていて10,000 mの深海でも実験が可能である（例えば、日油技研社製、HX-10, Noriki et al., 1995 : 図1）。

捕集された試料の分解を防ぐために、試料捕集容器はろ過海水で作った5%ホルマリン溶液をホウ酸ナトリウムで中和した溶液で満たしておく（Knauer and Asper, 1989）。

粒子の化学分析：粒子の基本的化学成分は以下のように分析する。

試料瓶に捕集された粒子試料はスイマーを取り除いてから0.6 μm ヌクレポアーフィルター上にあつめる（Knauer and Asper, 1989）。フィルター上の試料は60 $^{\circ}\text{C}$ で36時

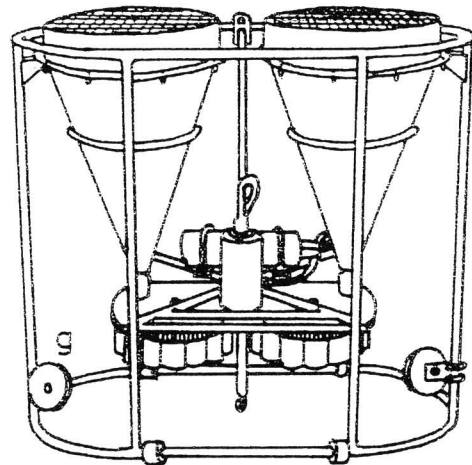
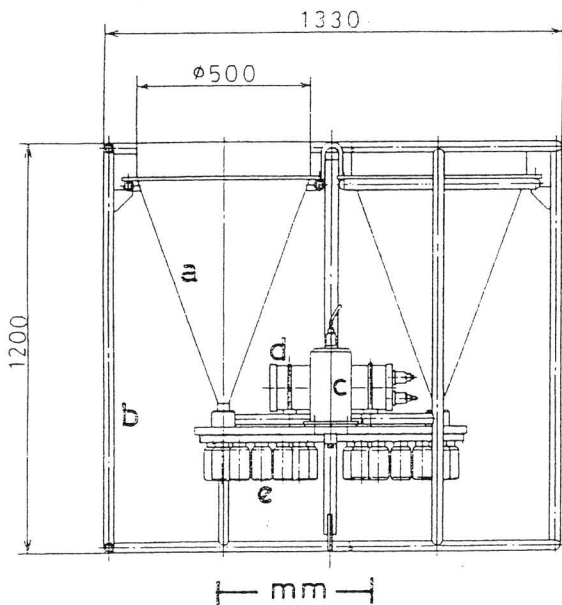


図1 時間分割式セジメントトラップ

間、真空乾燥したのち重量を測定する。

有機物量はCHN分析計で測定した。もしくは、乾燥試料を450℃で24時間燃焼して、この時減少した重量を有機物量とした(CF:灼熱減量)。

炭酸カルシウムは試料にリン酸を加えて発生した二酸化炭素をクーロメーターで測定して換算した。

化学成分を分析するために、乾燥試料をテフロン密閉容器に取り、濃硝酸、濃過塩素酸、フッ化水素酸の混合液を加えて150℃で5時間分解する(Noriki et al., 1980)。

分解溶液中のケイ素、リンを比色法で、Al、Feなどは原子吸光法で希土類元素は、CdとInを内部標準として加えたのち、ICP-MS法で測定した。

粘土鉱物とオパールの内容量は以下の関係から求めた。

粘土鉱物(Clay: アルミノケイ酸塩; %)

$$= \text{Al} (\%) \times 14.28$$

オパール(生物起源ケイ酸塩; %)

$$= \text{Total SiO}_2 (\%) - \text{Clay} (\%) \times 0.6$$

3. 北西部太平洋における粒子束の鉛直増加

生物が作る粒子態物質は海水中で分解され易い。それゆえ、生物起源粒子の沈降量は深さと共に減少することが予想される。一方、海水中で分解され難い陸起源粒子は減少しない。

アルミニウムは陸起源粒子の主成分の一つであり、約8%を占めている。それゆえ、アルミニウムは難溶性の陸起源物質の挙動を知るうえで良い指標となる。

3.1 実験

セジメントトラップ実験は図2と表1に

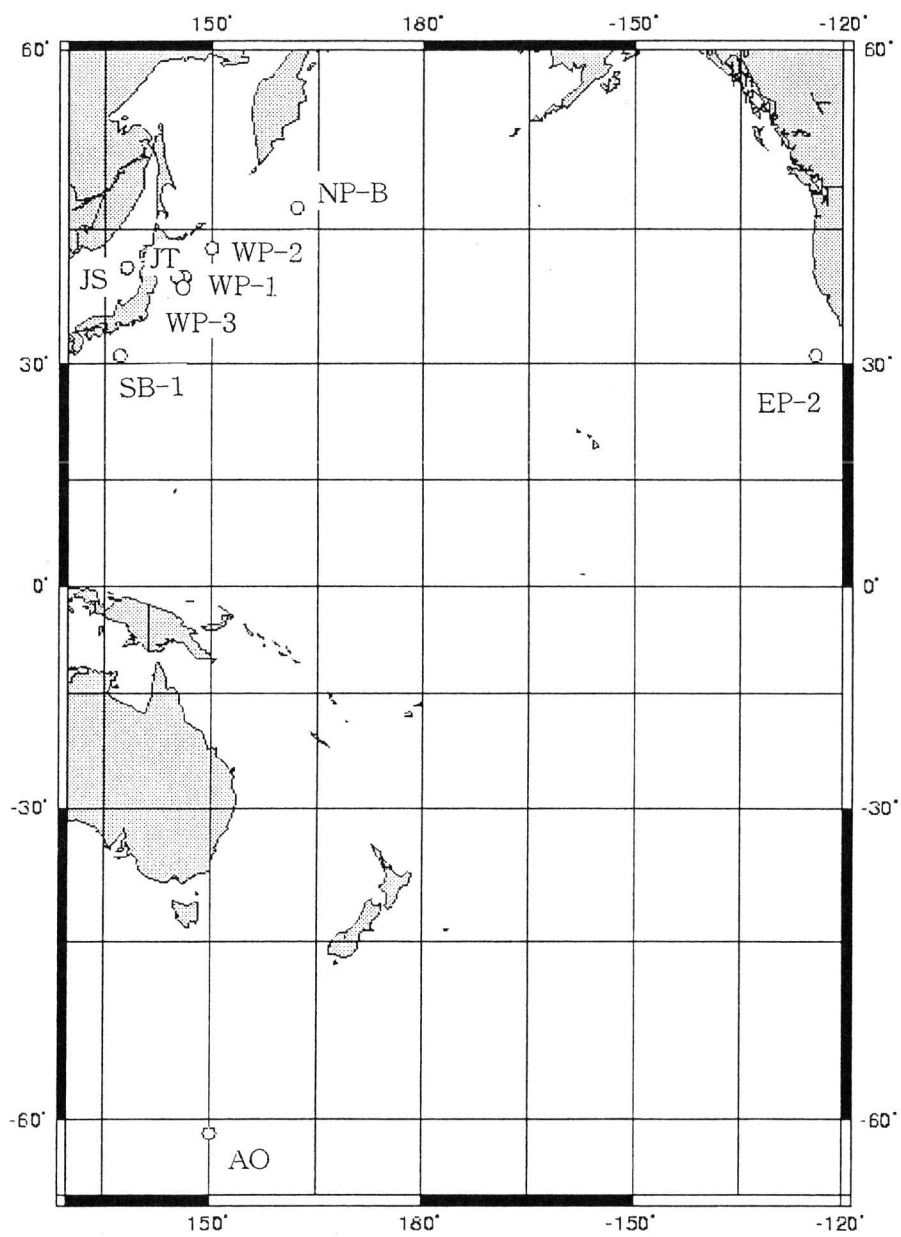


図2 試料採取地点

表1 西部北太平洋でのセジメントトラップ実験

Station code	Location		Month/year	Duration	Water depth (km)
NP-B	46° 49' N	162° 07' E	8/85-6/86	74 x 4	5.67
WP-2	43° 00' N	150° 14' E	4/85-5/85	13	5.02
JS	40° 50' N	138° 42' E	9/84	13	3.35
WP-1	40° 31' N	146° 28' E	8/83-9/83	18	5.16
WP-3	40° 00' N	145° 26' E	9/84-4/85	55x 4	5.27
SB-1	31° 32' N	137° 05' E	1/87-3/87	10x 4	4.30
EP-3	17° 29' N	116° 01' W	12/82-1/83	24	3.87
AO	61° 33' S	150° 27' E	12/83-1/84	24	3.58

示した地点で行った。セジメントトラップは時間分画式の他に、全量型（設置から揚収までの一期間の粒子を集める）による結果も含まれている。

粒子の化学分析は通常の方法で行った。

3.2 結果

セジメントトラップで実測した沈降粒子中のアルミニウム粒子束を図3に示す。セジメントトラップで実測したアルミニウムの粒子束は海域によって、また深さによって異なっていた。

いずれの測点でも粒子束は深さとともに増加の傾向にあった。

粒子中のAl濃度も深さとともに増していた。表2には実測値を基に「表面0 m」「2 km」そして「4.3 km」に内挿または外挿した粒子束をあげてある。「2 km」はもっとも実測値が多い水深、「4.3 km」は西部太平洋の平均水深である。Al粒子束の深度による増加率は海域によって異なっていた。西部北太平洋のアジア大陸に近い測点、あるいは大陸棚斜面に近い場所で大きく、アジア大陸から離れると小さくなった。例えば、WP-1やSB-1でのAl粒子束は北部北太平洋

のNP-Tに比べると1~2桁も大きく、深さによる増加率も大きい。さらに、東部太平洋（EP-3）南極海（AO）でのAl粒子束とその増加率も小さい。

「表面0 m」に外挿したAl粒子束は西部太平洋で0.5~3.8 mg/m²/dayであり、中央太平洋よりも大きい。これらの「表面0 m」の外挿値は大気からの粒子降下量から見積もったAlの降下量と良く一致する。従って、深さとともに水中で増加するAlは海中で溶存態から粒子態へと変化したもの、あるいは浅い沿岸域から水平的に外洋に向かって移動しながら沈降したものとが考えられる。

Alは海水に溶け難いので海水中のAl濃度は極めて低い。それゆえ、溶存態がすべて粒子態となっても粒子束の増加分は説明できない。Al粒子束が深さとともに増加する事実は河川から運ばれて沿岸域にもたらされた陸起源粒子が深海に向かって移動していることの証拠であろう。

4. 日本海溝域での物質移動

日本列島と太平洋海盆の間には水深7,000 mを超える日本海溝がある。この日

表2 0 mと4.3 kmに外挿したAl粒子束

Station code	Al flux: mg/m ² /day		
	0m	2km	4.3km
NP-B	(0.14)	0.43	0.78
WP-2	(0.50)	1.44	(2.52)
JS	(0.81)	1.34	(1.95)
WP-1	(3.80)	4.20	(4.65)
WP-3	(1.33)	1.72	2.18
SB-1	(3.37)	4.80	(6.45)
EP-3	(0.14)	0.18	(0.23)
A0	(0.03)	0.05	(0.08)

(): 外挿値

本海溝深海周辺海域での物質輸送機構をセジメントトラップ実験によって得た結果を基に考えてみる。

指標として使う成分はAlと希土類元素である。希土類元素はアルミノケイ酸塩粒子の起源を推定するための有効な元素群である。西部北太平洋域では、陸起源粒子は主に、日本列島とアジア大陸から供給されている。日本列島は玄武岩質、アジア大陸は花崗岩質からなっているので希土類元素のパターンを解析すれば供給源を推定できる (Allegre and Michard, 1974)。

4.1 実験

セジメントトラップを1996年7月から1997年6月まで、北部の日本海溝(40° 29' N, 144° 31' E; 水深7.6 km: 図1のStn. JT)に設置した。設置した水深は1.1, 4.3, 7.2 kmである。

粒子の化学成分は前に述べた方法で測定した。

4.2 結果

4.2.1 沈降粒子の粒子束と主成分組成の季節変動

全粒子束と主成分組成の結果の一例を表3に上げた。水深1.1 km層での全粒子束

(TMF)は初夏(R1)で220 mg/m²/dayそして、その他の季節では100 mg/m²/day以下であった。1.1 km層での平均は65.7 mg/m²/dayであり、同じ水深でくらべると、赤道太平洋の約2倍、中央太平洋の約20倍の大きさである (Honjo et al., 1995, Noriki and Tsunogai, 1986)。オパール、炭酸カルシウムそして有機物粒子の合計は約70%であった。

4.3 km層と7.2 km層での全粒子束はそれぞれ、184 ~ 1,228 mg/m²/dayと322 ~ 1,662 mg/m²/day、最大の粒子束は5 ~ 6月(W13: 4.2 kmとY13: 7.2 km)に観測された。

生物起源粒子の沈降速度は南極海での実験で200 m/day (Noriki et al., 1985)、北大西洋では100 m/day (Honjo and Manganini, 1993)と見積もられている。従って、初夏に観測された大きな粒子束は春のブルームによるものと考えられる。

オパール粒子束は4.3 km層で増えている。この海域では一年を通して、大陸棚の1,500 m層で南西方向の流れが流速計によって観測されている (Uehara et al., 1997)。4.3 km層での粒子束の増加は浅海域の粒子もしくは表面堆積物が水平的に輸送されたことを示しているのであろう。

14の希土類元素の濃度は1.1 km層で

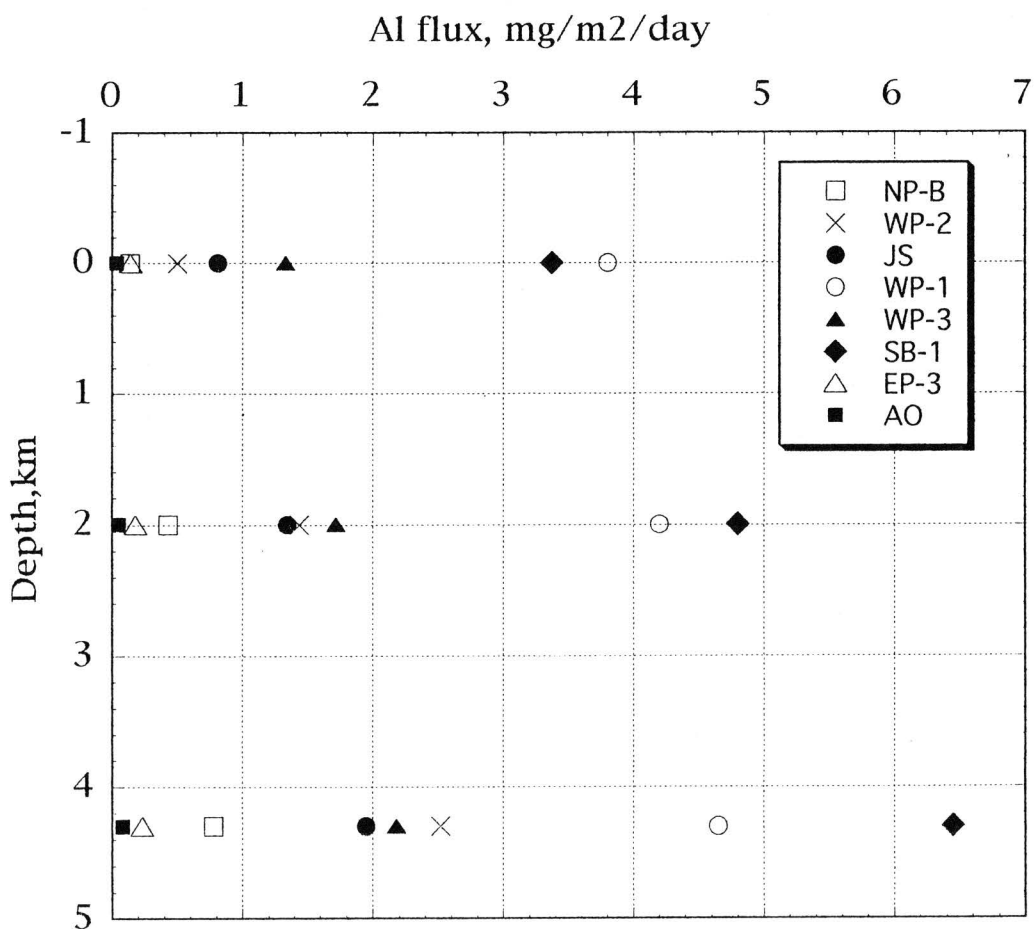


図3 アルミニウム粒子束の鉛直的増加

10 ~ 40 ppm、4.3 km 層で 15 ~ 60 ppm そして 7.2 km 層で 25 ~ 90 ppm であった。Al と 14 の希土類元素との濃度には相関係数 0.94 以上で正の相関があった。

4.2.1 粒子中の希土類元素と粘土粒子の起源

Al 濃度から見積もったアルミノケイ酸塩粒子束は深さとともに増加する。海洋表面への降下量は水中で実測された粒子束よりも小さいので、深さとともに増加する粒子は水平的に輸送されたアルミノケイ酸塩粒子と考えられる。

Ce は 4 価のイオンとなるので、希土類元素に中でもっとも反応性の高い元素として知られている (de Baar et al., 1985)。北太平洋深層水中の Ce 濃度は約 7 pmol/kg (Nozaki, 1992) である。海洋で Ce の平均滞留時間は約 100 year (Whitfield and Turner, 1987) であるので、7.2 km の水柱からの除去量は 0.067 mg/m²/year と見積もられる。実測された Ce 粒子束は 7.2 km 層で 7.3 mg/m²/year であった。計算値は実測値の 1% 以下であった。これらのことは、水中の溶存 Ce の粒子化による除去は無視できるほど小さいことを示唆している。

一方で、希土類元素と Al は正の相関が

表3 北部日本海溝域での全粒子束と沈降粒子の化学成分

Sample No.	Duration		TMF mg/m ² /day	Clay %	Opal %	CaCO ₃ %	Org.M %
	Open	Close					
R1	7.6.00	7/30/96	220	8.28	45.5	7.29	24.1
R2	7/30/96	8.25.00	68.0	11.6	42.5	5.36	27.7
R3	8.25.00	9.19.00	39.6	13.6	32.5	8.16	36.3
R4	9.19.00	10/13/96	55.4	14.9	21.3	13.1	39.2
R5	10/13/96	11.8.00	38.4	20.8	14.4	11.4	41.9
R6	11.8.00	12.3.00	25.9	25.7	8.97	13.8	40.8
R7	12.3.00	12/27/96	24.9	28.8	14.7	12.4	30.4
R8	12/27/96	6/13/97	53.6	22.1	31.5	9.11	24.7
W1	7.6.00	7/30/96	525	30.8	32.9	7.04	20.9
W2	7/30/96	8.25.00	426	28.1	36.9	6.73	18.0
W3	8.25.00	9.19.00	393	29.1	34.2	1.97	18.1
W4	9.19.00	10/13/96	342	32.3	29.8	8.48	18.9
W5	10/13/96	11.8.00	379	44.6	25.7	9.66	17.6
W6	11.8.00	12.3.00	349	31.4	30.1	5.85	17.1
W7	12.3.00	12/27/96	363	39.8	24.3	8.24	17.4
W8	12/27/96	1.22.01	218	39.0	32.5	14.6	15.3
W9	1.22.01	2.16.01	198	33.8	20.4	12.7	20.3
W10	2.16.01	3/12/97	345	43.0	13.6	8.36	19.8
W11	3/12/97	4.7.01	184	32.8	28.4	10.6	19.5
W12	4.7.01	5.2.01	489	28.7	38.5	6.82	18.0
W13	5.2.01	6/13/97	1228	10.4	48.7	5.18	20.3
Y1	7.6.00	7/30/96	482	40.6	29.9	3.18	17.2
Y2	7/30/96	8.25.00	485	52.4	23.3	0.85	16.5
Y3	8.25.00	9.19.00	501	60.8	18.3	1.30	15.2
Y4	9.19.00	10/13/96	1380	61.8	17.0	0.92	13.2
Y5	10/13/96	11.8.00	714	68.1	13.0	0.50	14.1
Y6	11.8.00	12.3.00	961	68.7	11.9	0.28	13.0
Y7	12.3.00	12/27/96	607	74.0	9.7	0.29	13.5
Y8	12/27/96	1.22.01	239	53.4	13.0	8.98	23.8
Y9	1.22.01	2.16.01	322	53.4	19.4	2.69	18.3
Y10	2.16.01	3/12/97	600	55.7	32.1	0.81	15.0
Y11	3/12/97	4.7.01	541	66.7	13.9	0.42	15.0
Y12	4.7.01	5.2.01	593	54.3	21.0	2.46	15.8
Y13	5.2.01	5/26/97	1662	21.4	53.8	0.74	20.5

R: 1.1km, W: 4.3km, Y: 7.2km

あった。すなわち、希土類元素はアルミノケイ酸塩の指標として扱うことができることを意味している。

軽希土 (LREEs) と重希土 REEs (HREEs) の比は酸性岩で大きく玄武岩で小さい。アジア大陸からの "黄砂" は花崗岩からなっているので高いLREE/HREE比をもっている (Taylor et al., 1983)。一方、日本列島地殻は玄武岩からなっていてLREE/HREE比は小さい (Waber et al., 1996)。

希土類元素同士の関係は正の相関があった。相関係数は深い層で大きい。近くの希土類元素同士の相関が他の関係よりも良い。従って、希土類元素は起源となっている粒子の性質を記録したまま沈降粒子に存在していると判断できる。

ここでは、軽希土/重希土としてLa/Yb比を用いることにする。沈降粒子中のLa/Yb比を表4に示した。平均地殻、表層堆積物のLa/Yb比も示した。1.1 km層では、7.35

表4 沈降粒子、堆積物、地殻などのLa/Yb比

	Latitude(° N)	Longitude(° E)	La/Yb
地殻			
日本列島			8.42
アジア黄土	36	104	12.9
河川			
鶴川	42.5	142	8.16
表層堆積物			
日本海溝	40.5	145	8.17
日本海	41	139	6.78
沈降粒子 (本研究)			
1.1km			7.35-10.1(8.89)
4.3km			8.24-9.84(8.91)
7.2km			8.21-9.96(9.43)

() : 平均値

から10.1の間ではっきりとしたLa/Yb比の変化があった。アルミノケイ酸塩粒子の起源が季節によって変化していることを示唆している。

冬季に観測した大きなLa/Yb比はアジア大陸起源の粒子の性質を反映していると思われる。一方、小さなLa/Yb比は1.1 km層の夏季に観測された。この季節は、日本列島起源の粒子が沈降していたことになる。

日本列島の北部では3月から4月の春季に雪解けがある(Noriki et al., 1993)。また、ほぼ同じ時期に表面水の温度上昇による成層化と日照量の増加によって春季ブルームが起こる。そこで、この時生じる生物起源粒子にアルミノケイ酸塩粒子が吸着して深層に運ばれていることが予想される。

冬季の1.1 km (期間: R5-R7) 層では、大きなLa/Yb比が観測された。これは、大気経路の黄砂の影響と考えられる。

そこで、北部日本列島のアルミノケイ酸塩粒子中のLa/Yb比を8.42、アジア大陸起源のレスの値を12.9と仮定して、2つの起源の寄与率を計算した。1.1 km層では粒子の70%は日本列島起源であった。

7.2 km層でのLa/Yb比は約9.5であり、1997年5月の13期間目を除けば、大きな季節変動はなかった。このことは、沈降粒子の約90%が日本列島起源のものであることを示している。7.2 km層の13期間目のLa/Yb比は8.64であった。この比は他の期間の粒子に比べて明らかに小さく、浅い層で集められた粒子のものに近い。この小さなLa/Yb比を持つ粒子は雪融けによって浅海にもたらされた粒子が春季ケイ藻ブルームによるオパール粒子と凝集体を作って急速に深海に運ばれたことを示唆している。そして、7.2 km層でのLa/Yb比は1.1 kmや4.3 km層にくらべて変動が小さい。浅海域から深海にむかって大陸斜面に沿って日本列島起源の大きなアルミノケイ酸塩粒子の供給があることでこのことは説明できる。

このような斜面に沿った物質の移動機構を"Shelf conveyor"と名付けた。

5. 三陸はるか沖地震による粒子の移動

日本海溝域の特徴の一つに海底地震の発生があげられる。地震による乱泥流は大量の物質を短い時間で深海へ運んでいること

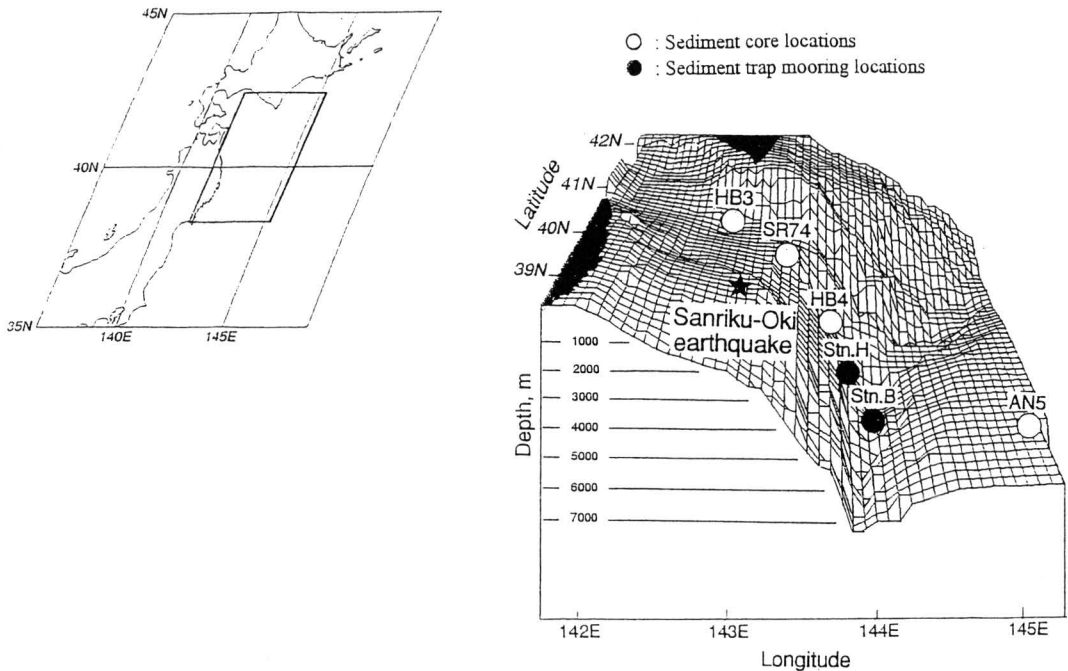


図4 日本海溝での試料採集地点

が予想できる。

西部北太平洋沿岸域に供給された物質の西部北太平洋海盆への移動を、より詳細に議論するためには、海底地震による物質移動の様子を明らかにする必要がある。

北部日本海溝、40° 26' N、144° 28' Eでセジメントトラップ実験を行っていた期間(1994年12月28日)にマグニチュード7.5の三陸はるか沖地震が、セジメントトラッ

プ実験地点の付近、40° 27' N、143° 43' E、で発生した。この地震の直後に日本海溝の深層で、セジメントトラップによって大きな粒子束を観測した。

ここでは、地震発生前後の沈降粒子束と粒子の化学成分の時間変動を明らかにすると同時に、周辺海域の堆積物表層の化学成分との比較をすることによって、粒子の移動機構を考察する。

表5 セジメントトラップ係留地点と堆積物採取地点

	Water depth m	Latitude N	Longitude E
Sediment trap			
Stn. B	7150	40° 26'	144° 28'
Stn. H	5370	40° 55'	144° 13'
Sediment, 0-1cm			
HB3	2051	41° 09'	143° 10'
SR74	2600	40° 39'	143° 42'
HB4	4620	40° 42'	144° 02'
AN5	5270	39° 57'	145° 26'

表6 全粒子束と粒子の化学成分

Period	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	T8	T9	T10	T11	T12	T13
Open Date	10/20/94	11/06/94	11/23/94	12/10/94	12/27/94	01/13/95	01/30/95	02/16/95	03/05/95	03/22/95	04/08/95	04/25/95	05/12/95
Days Open	17	17	17	17	17	17	17	17	17	17	17	17	17
Total flux, g/m ² day													
1km	0.21	0.19	0.11	0.03	0.03	0.07	0.04	0.02	0.03	0.03	0.04	0.21	0.52
4.2km	0.59	0.40	0.51	0.49	0.97	0.83	0.57	0.61	0.52	0.29	0.41	0.97	1.70
6.8km	0.46	0.51	0.56	0.22	4.3	3.7	2.1	2.9	1.9	1.5	1.6	1.4	1.5
CaCO ₃ , %													
1km	12.5	15.7	18.2	20.0	12.3	4.87	8.60	9.11	9.62	15.3	29.7	7.67	2.90
4.2km	7.70	8.69	9.95	9.71	4.77	5.43	5.95	6.19	6.93	7.54	12.8	5.82	5.12
6.8km	4.31	3.20	3.80	4.40	0.42	0.72	0.88	0.58	0.86	1.20	1.85	2.82	2.28
B-SiO ₂ , %													
1km	39.8	45.7	28.4	22.7	22.8	14.9	6.26	29.7	38.2	37.6	33.5	59.6	72.0
4.2km	38.0	38.1	36.5	32.9	35.6	36.5	37.9	36.8	41.3	41.6	35.2	55.3	60.4
6.8km	35.2	60.4	32.1	30.0	28.2	30.1	20.6	22.8	24.6	23.3	22.3	23.2	56.6
Org-C, %													
1km	5.6	6.6	6.1	6.8	5.7	6.8	8.8	10	5.1	3.7	6.2	4.9	5.7
4.2km	4.2	4.5	4.7	4.3	3.7	3.9	3.7	3.4	3.5	3.3	3.4	3.7	3.9
6.8km	4.3	3.4	3.3	3.8	2.1	2.3	2.4	2.2	2.3	2.2	2.2	3.3	3.1
Al, %													
1km	2.64	1.08	2.08	1.78	2.54	1.29	1.97	2.45	1.88	1.64	0.68	0.47	0.16
4.2km	4.07	4.41	4.08	4.35	4.51	4.30	3.52	3.40	3.47	3.11	2.94	1.28	1.18
6.8km	4.04	4.86	4.66	2.85	5.37	5.56	5.41	5.57	4.98	4.77	4.80	2.72	3.10
Fe, %													
1km	1.19	1.04	1.39	0.57	1.15	1.25	0.79	0.98	0.75	0.68	0.72	0.51	0.09
4.2km	2.93	2.73	2.63	2.81	3.29	2.92	1.97	1.95	2.01	1.82	1.68	0.88	0.56
6.8km	2.94	3.29	3.24	1.79	3.72	3.90	3.74	3.85	2.93	2.55	2.58	1.32	1.62
Mn, ppm													
1km	208	127	342	280	192	172	249	274	225	232	101	78	42
4.2km	419	573	450	622	429	364	594	515	486	522	417	208	161
6.8km	817	1059	1105	911	1739	1662	1535	1667	1450	1302	1387	789	787

5.1 実験

時間分画式HX-10 セジメントトラップを、40° 26' N, 144° 28' E(水深7.2km)に1994年10月から1995年5月まで係留した(図4と表5)。設置水深は約1 km, 4.2 km, 6.8 kmである。17日間隔で沈降粒子試料を採取した。

堆積物試料は日本海溝の日本側斜面、海溝中央部、太平洋海盆で採取した(図4と表5)。

化学分析は通常の方法の他に化学分画によって4つの部分に分ける存在状態別分析も行った(Koschinsky and Halbach, 1995)。(1) 酢酸と酢酸ナトリウム(pH 5) 可溶部分、(2) 塩酸ヒドロキシルアミン-塩酸(pH 2) 可溶部分、(3) シュウ酸/シュウ酸アンモニウム(pH 3.5) 可溶部分、そして(4) 残渣部分である。

5.2 結果

5.2.1 全粒子束の季節変動と粒子中の主成分との関係

全粒子束の結果を表6に示す。1 km層では、0.03 ~ 0.52 g/m²/dayの範囲で季節変動していた。平均は0.12 g/m²/dayであった。1994年12月から1995年3月の冬季間は、秋や春に比べて小さな全粒子束であった。

4 kmでの全粒子束も季節変動しており、0.29 ~ 1.68 g/m²/dayの範囲であった。平均は0.68 g/m²/dayである。1 km層と同じように、4月に大きな粒子束が観測された。

粒子の主成分組成を見ると、1 kmでは春季の12, 13期間に生物起源SiO₂濃度が50%以上であった。春季での生物起源SiO₂粒子束は0.1 ~ 0.4 g/m²/dayであり、冬季の約10倍であった。また、4 kmでも、12, 13期間では、生物起源SiO₂濃度が50%以上であり、その粒子束は冬季の約5倍であった。

一般に、全粒子束の大きさは、表層の生

物活動、特にケイ藻の活動に連動していることが報告されている。この海域では、例年4月頃からケイ藻のブルームがあることが知られている。生物起源SiO₂による1 kmと4 kmでの大きな全粒子束は、ケイ藻の活動によるものである。1 km層に比べて4 kmの生物起源SiO₂粒子束が大きい。これは、生物起源SiO₂粒子が鉛直方向と同時に水平的に深海へ運ばれていけば説明がつく。

6.8 km層でも全粒子束は季節変動しており、0.22 ~ 4.33 g/m²/dayであった。1 kmと4 kmでは、春季に最も大きな大きな粒子束が観測されたのに対して、6.8 kmでは、5期間目(12月から1月)に極大値が観測された。粒子中のAlの濃度は、逆に、春の季節では3%もしくはそれ以下であり、冬季の平均濃度5.2%に比べると、有意に低い。

6.8 km層において、大きな全粒子束を観測した冬季の期間5では、生物起源SiO₂濃度は増大していない。むしろ、濃度は低い。生物起源成分の濃度の減少は、生物起源炭酸カルシウムにはっきり見ることができる。すなわち、6.8 km層では、1~4期間の生物起源炭酸カルシウムの濃度の平均が3.9%であったのに対して、期間5では急激に1%以下に減少した。また、有機炭素含量も期間5で約30%減少していた。すなわち、大きな粒子束は生物起源粒子の増加によっては説明できない。

一方、Al濃度は期間5で5%以上に増大していた。期間5での陸起源成分のFe濃度は、それ以前に比べて、Alと同じように高い。

6.8 km層の粒子のFe/Al比は期間1~4の平均0.68と期間5の0.69では差が見られない。しかし、Mnについてみれば、期間5では濃度が約2倍に増加していた。そして、期間5の粒子中のMn/Al比は0.032と計算され、期間1~4の粒子の平均0.024に比べる

と明らかに大きい。すなわち、6.8 km 層の12月に見られた急激な全粒子束はMnを豊富に含んだ非生物起源粒子の増加に密接に関連していることが示唆された。

Noriki et al.(1993)は1988～1989年に、このトラップ設置点の西側の、北部日本海溝の大陸棚斜面において、5,000 m 層で冬季に大きな全粒子束を観測した (Stn.H: 図4)。セジメントトラップによって観測され

たAl粒子束の極大は、海水の鉛直混合が一番激しい2月であり、5,000 mよりも浅い海域の表層堆積物の再懸濁と深海への移動のためであった。また、Al粒子束が極大の時には、粒子中のAl濃度は4.8%、Fe濃度は2.7%であり、その他の期間と大きな差はなかった。Mn濃度は1,200 ppm (未発表)であり、すなわち、Mn/Al濃度比は0.025と計算され、期間1～4の平均に近い。

表7 沈降粒子の化学成分の存在状態

Element Fraction*	T 2	T 3	T 4	T 5	T 6
Al, %					
A	0.03	0.02	0.02	0.02	0.03
O	0.07	0.06	0.06	0.08	0.09
R	4.76	4.58	2.77	5.27	5.45
Total	4.86	4.66	2.85	5.73	5.56
Fe, %					
A	0.07	0.09	0.03	0.05	0.06
O	0.11	0.17	0.06	0.13	0.14
R	3.11	2.98	1.70	3.54	3.70
Total	3.29	3.24	1.79	3.72	3.90
Ca, %					
A	1.28	1.52	1.76	0.17	0.29
O	0.04	0.05	0.06	0.01	0.02
R	0.37	0.46	0.38	0.30	0.39
Total	1.69	2.03	2.20	0.48	0.70
Mn, ppm					
A	342	349	336	368	378
O	459	480	378	961	875
R	258	276	197	410	409
Total	1,059	1,105	911	1,739	1,662
Cu, ppm					
A	12.2	11.1	11.6	19.5	19.1
O	6.9	6.5	6.9	13.0	10.0
R	55.7	46.8	57.4	58.9	60.5
Total	74.8	64.4	75.9	91.4	89.6
Co, ppm					
A	7.2	7.3	7.0	4.2	8.4
O	44.6	44.5	46.6	85.0	58.1
R	31.8	29.0	30.5	29.7	32.8
Total	83.6	80.8	84.1	118.9	99.3

A: 酢酸可溶部分; O: 塩酸ヒドロキシルアミン可溶部分; R: 残さ

6.8 kmでの大きな全粒子束が観測されたのは12月であり、冬季海水鉛直混合のおこる以前であること、その時のMn/Al濃度比が1989年の2月よりも大きいこと、これらの事実は、期間5の6.8 kmでの大きな全粒子束は、海水の冬季鉛直混合による粒子の移動によるものではないことを示している。

1994年12月28日、40°27'N, 143°43'Eで、三陸はるか沖地震が発生した。6.8 km層での、1994年12月27日から1995年1月13日までの期間5の大きな全粒子束の最も可能性のある説明は、地震の影響である。一つは、周辺の5,000 mよりも深い海域の海底堆積物が舞い上がって、粒子が再移動してトラップに捕捉されたと考えること、もう一つは、表層堆積物が乱されて間隙水中の成分が底層水に回帰して粒子態となったと考えることである。

5.2.2 沈降粒子の化学成分の特徴と

周辺海域堆積物との比較

大きな粒子束を観測した時の、粒子の起源を知るために、粒子を化学分画して、特徴を調べた。結果を表7に示す。

AlとFe: 期間1~4では、陸起源粘土粒子の主成分であるAlの濃度は3~4%であった。その時の粒子では、95%以上が難溶性な残さ部分にあった。すなわち、アルミノケイ酸塩粒子として存在していた。大きな粒子束が観測された期間5の粒子の全Al濃度は約5%であり、前の期間よりは高い。しかし、約95%は難溶性部分にあり、それ以前と大きな差は見られなかった。Alは、海洋においては、酸化/還元状態によって化学形を変えにくい。地震によって海底表層が乱されて、間隙水中のAlが底層水に供給されたとしても、それが粒子化することは考えにくい。Al粒子束は期間5で約1桁も大きくなったのは、間隙水由来ではな

く、粒子態物質の供給によるものが大きな要因であろう。

Alと同じように陸起源粘土粒子の主成分

表8 堆積物表層の化学成分

Element Fraction*	Sediment, 0-1 cm	
	SR74	AN5
Al, %		
A	0.05	0.06
O	0.15	0.26
R	4.03	4.69
Total	4.23	5.01
Fe, %		
A	0.06	0.15
O	0.17	0.38
R	3.45	2.71
Total	3.68	3.24
Mn, ppm		
A	16.9	706
O	14.8	1552
R	346	512
Total	378	2770
Ca, %		
A	0.41	0.19
O	0.04	0.03
R	0.89	1.01
Total	1.34	1.23

A,O,R は表7と同じ

であるFeの全濃度は期間1~4では約3%、期間5では約4%に増加していた。しかし、いずれの期間でも、Feの約90%は難溶性な形として存在していた。このことも、期間5の大きな粒子束は生物起源粒子ではなく、陸起源粒子によるものであることが言える。

しかし、AlとFeの全濃度、および存在状態の結果からは、大きな粒子束が観測された時の粒子の起源を、その前の粒子の起源と区別するのは難しい。

塩酸ヒドロキシルアミン可溶の酸化物部分のFeの存在割合は10~15%であり、Alがそのフラクションに存在している割合に

表9 化学成分と存在状態別の割合

Period	Component (Average)	Al %	Mn ppm	Cu ppm	B-SiO ₂ %	CaCO ₃ %	Org-C %
T1-T4							
	I i	5.92	582	27.5	25.3	3.00	1.9
	P i	4.23	516	35.5	20.3	9.98	4.4
	O i	5.86	3549	91.0	17.4	2.33	1.3
	M i	4.47	973	65.1	21.8	5.45	3.4
T5-T6							
	I i	5.92	582	27.5	25.3	2.10	1.9
	P i	4.41	397	51.9	24.1	6.68	3.8
	O i	5.86	3549	91.0	17.4	2.33	1.3
	M i	5.47	1701	82.3	19.0	2.26	1.3
Sediment							
	Western Slope	5.92	582	27.5	25.3	3.00	1.88
	Eastern Slope	5.86	3549	91.0	17.4	2.33	1.27

表10 地震発生前後の6.8 km層に捕捉された粒子の起源

Period (Average)	Settling particle passed through 4.2km	Surface sediment	
		Western slope	Eastern slope
T1-T4	58 ± 11	18 ± 13	24 ± 10
T5-T6	17 ± 7	10 ± 10	68 ± 7

比べて大きい。Alに比べてFeの方が、海洋においては生物活動に必要な元素である。このことが、より labile なフラクションに Fe が存在する理由の一つであろう。

Ca: Caの全濃度は、期間5で、それ以前に比べて約半分に減った。この時、粒子中のCaの約70%は難溶な部分にあった。期間1~4では、Caの半分以上が酢酸可溶部分、すなわち炭酸塩として存在していた。期間5の炭酸カルシウムフラックスは、期間1~4の平均に比べて、大きな増加は見られなかった。さらに、全濃度が減少していたこと、難溶部分の割合が増加したことは、期間5の大きなフラックスは、非生物起源粒子Caの大きな寄与があったことを示唆している。

表8には、周辺海域の表層堆積物の化学成分が示してある。堆積物中のCaは、海溝内側では、30%、外側では少なくとも10%が、炭酸カルシウムとして存在していた。Caの結果からは、大きな粒子束を観測した期間5の粒子は、海溝の内側よりは外側の堆積物に近いことが言える。

MnとCo: Mnの全濃度は、期間5では1850 ppmであり、それ以前の約1,000 ppmよりも大きくなった。そして、塩酸ヒドロキシルアミンに可溶なフラクションのMnが有意に20%増加した。Coも期間5で塩酸ヒドロキシルアミン可溶部分が増加した。水深約5,000 mよりも深い海域での表層堆積物中のMn濃度は、沈降粒子のMn濃度よりも高い、と同時に塩酸ヒドロキシルアミン可溶フラクションも大きかった。

日高舟状海盆の5,000 m以浅の堆積物は、全Mn濃度は約400 ppm、塩酸ヒドロキシルアミンフラクションは10%以下であった。これらの浅海堆積物の付加では、期間5の粒子の化学的特徴は説明できない。

しかし、もし、海溝外側(AN5)の堆積物が海溝中心部のトラップ地点に移動した

とすれば、期間5の大きなMnの濃度、高い塩酸ヒドロキシルアミンフラクションは説明できる。

Coは、Feと同じように、MOOHの酸水酸化物を形成することが知られている。CoがMnと同じ様な挙動を見せたのは、見かけ上のもので、本当はFeの方に近いのかも知れない。

Cu: 表8には示していないが、期間5でCuの全濃度が、それ以前に比べて10%増加した。この時Cuは酢酸可溶と塩酸ヒドロキシルアミン可溶部分が増えた。しかし、その変化率は小さい。Cuは生物親和性元素として生物起源粒子に濃縮しているが、一方で、その濃度は陸起源アルミノケイ酸塩粒子中の濃度と大きな差はない。Cuからだけでは、期間5の大きな粒子束の起源を判別することは難しい。

以上の、Al、炭酸カルシウムそして、Mn結果から、期間5の急激な粒子束の増加をもたらした粒子は、高いMn酸化物を含む非生物起源によるものであることが明らかになった。そして、それは水深5,000 m以深の堆積物表面の化学成分に良く似ていた。地震の発生によって5,000 m以深の堆積物表層が乱されて、再懸濁した粒子がより深い site へ移動したのであろう。

5.2.3 再懸濁粒子の寄与

期間5の大きな粒子束を観測した時の粒子には、水深の深い海域での堆積物の再懸濁粒子が捕捉されていた事が明らかになった。

そこで、6.8 kmで捕捉される粒子の主要な部分は、(1) 海洋表層から鉛直的に運ばれてきたもの、(2) 一旦、浅海(海溝内側)の堆積物に到達した粒子が再移動したもの、(3) 一旦、海溝外側の深海の堆積物に到達した粒子が再移動したものの3つから成っていると仮定した。

すなわち、

$$M_i = X_1 \cdot P_i + X_2 \cdot I_i + X_3 \cdot O_i$$

ここで、

M_i : 成分 i の 6.8 km での粒子中の濃度

P_i : 4.2 km の粒子中の成分 i の濃度

I_i : 海溝西側斜面の堆積物中の成分 i の濃度

O_i : 海溝東側斜面の堆積物中の成分 i の濃度

X_1 : 沈降粒子の割合

X_2 : 海溝西側斜面の堆積物の割合

X_3 : 海溝東側斜面の堆積物の割合

微量成分を使うと、誤差が大きくなる可能性があるため、表9にあげた成分を使って、最小二乗法で期間5の粒子における X_1 、 X_2 、そして、 X_3 の寄与率を計算した。

結果を表10に示した。期間1~4では、6.8 km での粒子の約60%が鉛直的に運ばれてきた4.8kmの沈降粒子であった。6.8 kmの期間5では、68%が海溝東側、すなわち外側の堆積物が占めている、と計算された。すなわち、海底地震によって、周辺の堆積物の表層粒子が移動して、より深い海域へ移動したことが、セジメントトラップ実験によって、始めて、実測された。

6. おわりに

海洋化学学術賞を授かったのはまことに栄誉であり、(財)海洋化学研究所および本賞の選考委員会関係者に深く感謝いたします。

本稿は私の行ってきた研究の一旦を概説したものです。これらの研究は多くの仲間との合作であります。北海道大学水産学部分析化学教室、北海道大学大学院地球環境科学研究科化学物質循環講座、ならびに乗船中にお世話になった諸氏に感謝いたします。

最後に、良き話し相手であった^敬中山英

一郎博士に受賞の喜びを報告したいと思います。

参考文献

- Allegre, C. J. and Michard, G., 1974. Introduction to Geochemistry, D. Reidel Pub; pp. 34-36.
- Biscaye P. E., R. F. Andersen and Deck, B. L., 1988. Flux of particles and constituents to the United States continental slope and rise: SEEP-I. *Continental Shelf Research*, **8**, 855-904.
- De Baar, H., J., Bacon, M. P., Brewer, P. G. and Bruland, K. W., 1985. Rare earth elements in the Atlantic and Pacific Ocean. *Geochim. Cosmochim. Acta*, **52**, 1203-1219.
- Honjo S. and Manganini, S., J., 1993. Annual biogenic particulate fluxes to the interior of the North Atlantic Ocean; studies at 34° N 21° W and 48° N 21° W. *Deep-Sea Res.*, **40**, 587-607.
- Honjo, S., Dymond, J., Collier, R. and Manganini, S., J., 1995. Export production of particles to the interior of Equatorial Pacific Ocean during 1992 EqPac experiment. *Deep-Sea Res.*, **42**, 831-870.
- Knauer, G. and Asper, V., 1989. Sediment trap technology and Sampling. Report of the U. S. GOFS working group on sediment trap technology and sampling, U. S. GOFS planning report No. 10, U. S. GOFS planning and coordination office, Woods, Hole: p. 94.
- Koschinsky A. and Halbach, P., 1995. Sequential leaching of marine ferromanganese precipitates: Genetic implications. *Geochim. Cosmochim. Acta*, **59**, 5113-5132.
- Lampitt, R. S. and Antia, A. N., 1997. Particle flux in deep-seas: regional characteristics and temporal variability. *Deep-Sea Research*, **44**,

- 1377-1403.
- Noriki S. and Tsunogai, S., 1986. Particle fluxes and major components of settling particles from sediment trap experiments in the Pacific Ocean. *Deep-Sea Research*, **33**, 903-912.
- Noriki, S., Harada K. and Tsunogai, S., 1985. Sediment trap experiment in the Antarctic Ocean. Marine and Estuarine Geochemistry, eds., A. C. Sigleo and A. Hattori, Lewis Pub. Inc.: pp. 161-170.
- Noriki S., K. Nakanishi, T. Fukawa and Uematsu, T., 1980. Use of a sealed Teflon vessel for the decomposition followed by the determination of chemical constituents of various marine samples. *Bulletin of the Faculty of Fisheries*, Hokkaido University, **31**, 354-361.
- Noriki, S., R. Saito, C. Saito and Tsunogai, S., 1993. Seasonal variation of lithogenic flux in Japan Trench continental slope measured by sediment trap. In: Deep ocean circulation, physical and chemical aspects, T. Teramoto, editor, Elsevier Science Publisher, Amsterdam, pp. 211-219.
- Noriki S., T. Iwai, A. Shimamoto, S. Tsunogai and Harada, K., 1995. Spatial variation of Al flux in the North Pacific observed with sediment trap. In: Biogeochemical Processes and Ocean Flux in the Western Pacific, H. Sakai and Y. Nozaki, editors, Terra Scientific Publishing Company, Tokyo, pp. 345-354.
- Noriki S., M. Shimizu, K. Hamahara, H. Narita, T. Saino and Yanagi, T., 1997. Transportation of particulate material through the mouth of Tokyo Bay to the open ocean. *J. Oceanogr.*, **53**, 571-577.
- Nozaki, Y., 1992. Trace elements in the seawater: their mean concentrations and North Pacific profiles. *Chikyukagaku (Geochemistry)*, **26**, 25-39.
- Shiomoto, A., K. Sasaki, T. Shimoda and Matsumura, S., 1994. Primary productivity in the offshore Oyashio in the spring and summer 1990. *J. Oceanogr.*, **50**, 209-222.
- Taylor, S. R., McLennan, S. M., McMulloch, M. T., 1983. Geochemistry of loess, continental crustal composition and crustal model ages. *Geochim. Cosmochim. Acta*, **47**, 1897-1905.
- Uehara, K., Miyake, H., and Okazaki, M., 1997. Characteristics of the flows in the Oyashio area off Cape Erimo, Hokkaido, Japan. *J. Oceanogr.*, **53**, 93-103.
- Waber, E. T., Owen, R. M., Dickens, G. R., Hallway, A. N., Jones, C. E. and Rea, D. K., 1996. Quantitative resolution of eolian continental crustal material and volcanic detritus in North Pacific surface sediment. *Paleoceanog.*, **11**, 115-127.
- Whitfield, M. and Turner, D. R., 1987. The role of particles in regulating the composition of seawater. Aquatic surface chemistry, ed. W. Stumm, Wiley: pp. 457-493.
- Yanagi T., T. Hagita, T. Saino, T. Ishimaru and Noriki, S., 1995. Transport mechanism of suspended matter above the shelf slope at the mouth of Tokyo Bay. *J. Oceanogr.* **51**, 459-470.