

Article

북서태평양 아열대 해역에서 침강입자 플럭스의 시·공간 변동

김형직<sup>1</sup> · 형기성<sup>1</sup> · 유찬민<sup>1</sup> · 전동철<sup>2</sup> · 정진현<sup>2</sup> · 김부근<sup>3</sup> · 김동선<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>한국해양연구원 심해·해저자원연구부

<sup>2</sup>한국해양연구원 기후·연안재해연구부

(426-744) 경기도 안산시 상록구 해안로 787

<sup>3</sup>부산대학교 자연과학대학 해양시스템과학과

(609-735) 부산광역시 금정구 장전동 산 30

Temporal and Spatial Variations of Sinking-particle Fluxes in the Northwestern Subtropical Pacific

Hyung Jeek Kim<sup>1</sup>, Kiseong Hyeong<sup>1</sup>, Chan Min Yoo<sup>1</sup>, Dongchull Jeon<sup>2</sup>, Jin Hyun Jeong<sup>2</sup>,  
Boo-Keun Khim<sup>3</sup>, and Dongseon Kim<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>Deep-sea and Marine Geo-Resources Research Department, KORDI

<sup>2</sup>Climate Change & Coastal Disaster Research Department, KORDI

Ansan P.O. Box 29, Seoul 425-600, Korea

<sup>3</sup>Department of Oceanography, College of Natural Sciences, Pusan National University  
Busan 609-735, Korea

**Abstract:** Time-series sediment traps were deployed at 1,000 m water depth of the northwestern subtropical Pacific from July 2009 to June 2010, with the aim of understanding temporal and spatial variations of sinking-particle fluxes. The opening and closing of the traps was synchronized at 18-day periods for 20 events. Total mass fluxes showed distinct seasonal variations with high values for the summer-fall seasons and relatively low values for winter-spring. This seasonal variation at two stations was characterized by a distinct difference in CaCO<sub>3</sub> fluxes between the two seasons. The enhanced CaCO<sub>3</sub> flux in the summer - fall seasons might be attributed to an increased planktonic foraminiferal flux. Total mass flux at FM10 station was nearly 50% higher than that at FM1 station. The difference in CaCO<sub>3</sub> fluxes between two stations contributed nearly 70% of the difference of total mass fluxes. The CaCO<sub>3</sub> flux was a major component controlling temporal and spatial variation of sinking - particle fluxes in the western subtropical Pacific Ocean.

**Key words :** time-series sediment trap, total mass flux, organic carbon, CaCO<sub>3</sub>, planktonic foraminifera

1. 서 론

표층수온이 29°C 이상인 서태평양 난수역(Western Pacific Warm Pool)은 다른 적도해역의 표층수온 보다

2-5°C 높은 특성을 보이며, 이 해역에서 야기되는 열대 대류는 바람, 열, 수증기, 강우 등의 전 지구적 재분포에 매우 중요한 역할을 한다(McPhaden and Picaut 1990; Yan et al. 1992; Thunell et al. 1994; Garidel-Thoron et al. 2005). 또한, 서태평양 난수역은 태평양 적도해역에서 기원하는 엘니뇨/라니냐와 같은 기후-해양 환경변화에 따라

\*Corresponding author. E-mail : dkim@kordi.re.kr

그 위치와 범위가 변화한다(McPhaden and Picaut 1990; Yan et al. 1992; Thunell et al. 1994; Gupta and Kawahata 2002; Garidel-Thoron et al. 2005; Yamasaki et al. 2008). 일반적으로 엘니뇨가 발생하면 난수역은 서태평양에서 중앙태평양으로 이동되는 반면, 라니냐 기간 동안에는 서태평양 적도해역부터 아열대 해역까지 남-북 방향으로 그 세력을 확장한다(McPhaden and Picaut 1990; Picaut and Delcroix 1995; Picaut et al. 2002). 이러한 남방진동(El Niño Southern Oscillation)에 따른 난수역 위치 변화가 해양 생산성과 수층 내 침강입자 플럭스에 미치는 영향을 정량적으로 평가하기 위하여, 시계열 퇴적물 포집장치(Time-series sediment trap)를 이용한 입자 플럭스(Particle flux) 연구가 서태평양 적도해역( $10^{\circ}\text{S}$ - $10^{\circ}\text{N}$ )과 중위도 해역( $31$ - $40^{\circ}\text{N}$ )에서 활발히 수행되었다(Radenac and Rodier 1996; Kawahata et al. 1998; Kawahata et al. 2000; Gupta and Kawahata 2002; Kawahata and Gupta 2003; Okazaki et al. 2005; Kuroyanagi et al. 2008).

서태평양 아열대 해역( $11$ - $30^{\circ}\text{N}$ )은 난수역 북쪽 주변부에 위치하고 있어서 남방진동에 따른 난수역 위치와 세력의 변동이 해양표층 생산성과 수층 내 입자 플럭스에 미치는 영향을 평가할 수 있는 중요한 해역이다. 또한, 이 해역은 중위도 해역으로 열, 염분, 해양 생물 등을 수송하는 쿠로시오 해류(Kuroshio current)의 발원지로서 동아시아 지역의 기후와 해양 생태계 변화 기원을 이해할 수 있는 중요한 정보를 가지고 있다(Jian et al. 2000; Hsueh et

al. 2004). 하지만 지금까지 서태평양 아열대 해역에서의 일차 생산성, 해양 생태계 변화에 대한 연구는 서태평양 적도해역과 중위도 해역에서 수행된 연구결과들에 비해 미흡한 실정이다. 특히, 기초적인 일차 생산성, 생물 군집, 수층 내 침강입자 플럭스 변화에 대한 직접적인 정보를 제공하는 시계열 퇴적물 포집장치를 이용한 연구도 태평양 적도해역과 중위도 해역에 집중된 반면(Dymond and Collier 1988; Honjo et al. 1995; Karl et al. 1996; Kawahata and Gupta 2004; Honda et al. 2006; Kuroyanagi et al. 2008; Takahashi et al. 2009; Kim et al. 2010), 서태평양 아열대 해역에서는 거의 수행되지 않았다. 서태평양 아열대 해역에서 기초 생산성, 입자 플럭스, 해양 생태계 변화에 대한 연구는 적도해역에서 기원하는 해양환경 변화가 우리나라 주변 해에 미치는 영향을 평가하는데 필수적이다.

따라서 본 연구에서는 서태평양 아열대 해역 난수역 북쪽 주변부에 위치한 정점 FM10과 쿠로시오 해류의 영향권에 위치한 정점 FM1에서 약 1년간 시계열 퇴적물 포집장치를 계류하여 입자 플럭스의 변화를 정량적으로 관측하였으며, 이 두 정점에서의 입자 플럭스 변화를 시기적으로 비교분석하였다.

## 2. 연구 지역 및 연구 방법

서태평양은 위도에 따라 중위도 해역( $31$ - $40^{\circ}\text{N}$ ), 아열대

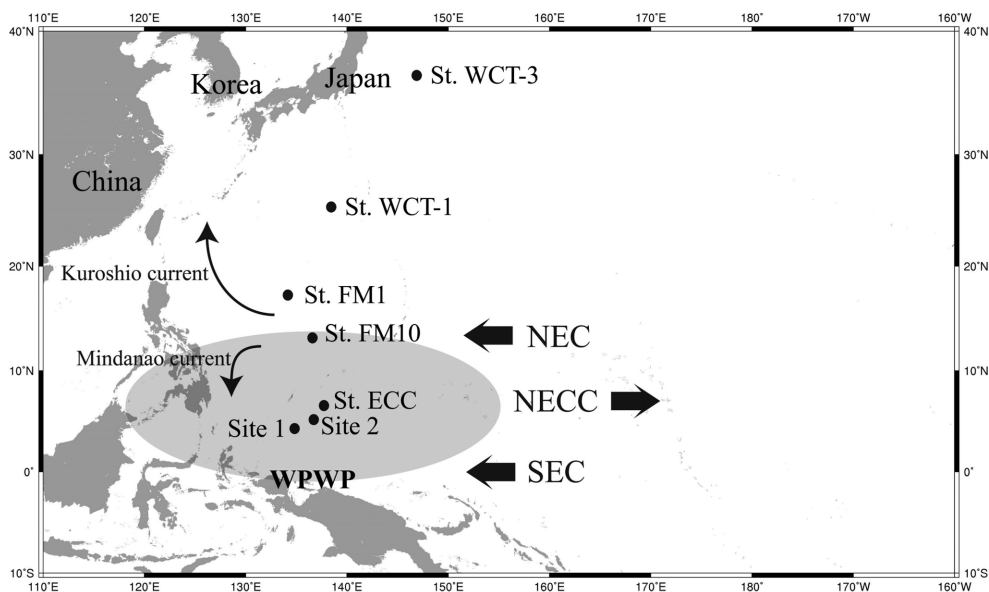


Fig. 1. Location of sediment trap mooring stations (FM1 and FM10) in the northwestern subtropical Pacific and other study sites; site 1 and 2 from Kawahata et al. (2000), St. ECC from Kempe and Knaack (1996), and St. WCT-1 and 3 from Mohiuddin et al. (2004). The mooring stations are marked by closed circles. NEC (North Equatorial Current), NECC (North Equatorial Counter Current), SEC (South Equatorial Current). The gray ellipse indicates the boundary of the Western Pacific Warm Pool (WPWP)

해역(10-31°N), 적도 해역(10°S-10°N)으로 구분되며, 서태평양 적도-아열대 해역의 표층해류는 무역풍에 의해 다양한 순환체계로 형성된다(Pickard and Emery 1982; Kawahata 2002; Mohiuddin et al. 2002). 서향류인 북적도 해류(North Equatorial Current)와 남적도 해류(South Equatorial Current) 사이에 동향류인 북적도 반류(North Equatorial Countercurrent)가 위치하며, 북적도 해류는 필리핀 연안에서 북향류인 쿠로시오 해류(Kuroshio current)와 남향류인 민다나오 해류(Mindanao current)로 나뉘었다(Kempe and Knaack 1996; Qiu and Lukas 1996; Kawahata et al. 1998; Kawahata et al. 2000; Kawahata 2002) (Fig. 1).

본 연구에서는 시계열 퇴적물 포집장치를 2009년 7월부터 2010년 6월까지 서태평양 아열대 해역 내의 난수역 북쪽 주변부와 쿠로시오 해류 영향권 두 곳에 계류하였다(Fig. 1). “난수역 북쪽 주변부에서 퇴적물 포집장치를 계류한 곳의 위치는 북위 13°31', 동경 136°03', 수심은 5263 m, 이 정점을 FM10이라 하였으며, 수심 약 1000 m에 시계열 퇴적물 포집장치를 계류하였다. 쿠로시오 해류 영향권에 계류한 곳의 위치는 북위 17°12', 동경 134°36', 수심은 5276 m, 이 정점을 FM1이라 하였으며, 정점 FM10과 마찬가지로 수심 약 1000 m에 시계열 퇴적물 포

집장치를 계류하였다.”

본 연구에 이용한 시계열 퇴적물 포집장치는 21개의 시료 병을 갖는 McLane PARFLUX Mark 7G이었다. 연구 기간 동안, 정점 FM1과 FM10에서는 동일한 시기에 약 18일 간격으로 침강입자를 포집하였다(Table 1, 2). 퇴적물 포집장치를 계류하기 전, 붕산나트륨(sodium borate)으로 중화된 약 5% 포르말린 용액을 시료 병에 넣어 수층 침강입자가 부패되지 않도록 하였다.

획득된 침강입자 시료는 지화학 분석을 위하여 WSD-10(Wet Sample Divider-10, McLane)을 이용하여 다섯 등분 하였으며, 이 중 네 개는 증류수로 세 번 이상 세척하여 동결건조를 실시하였다. 건조된 침강입자 시료의 무게를 5번 이상 측정하여 총질량 플러스를 계산하였다. 총탄소(Total carbon) 함량은 CNS 원소분석기(Carlo-Erba 1110 CNS elemental analyzer)를 이용하여 분석하였으며, 분석의 정밀도는 시료들 사이에 약 7개의 표준시료(Sulfanilamide, CE Instruments)를 사용하여 약 3% 이하로 유지하였다. 무기탄소(Inorganic carbon) 함량은 Coulometrics 무기탄소 분석기(CM5014 model, UIC)를 이용하여 측정하였으며, 분석의 정밀도는 약 ±0.2% 이하로 유지하였다. 탄산칼슘(CaCO<sub>3</sub>) 함량은 무기탄소 농도에 탄산칼슘의 분자량 비(CaCO<sub>3</sub>/C)인 8.33을 곱하여 계산하

Table 1. Sampling dates, fluxes and composition of sinking-particles at the FM1 in the northwestern tropical Pacific

Sample no.	Date open (day/month/yr)	Days	Flux (mg m <sup>-2</sup> day <sup>-1</sup> )			% of total	
			Total mass	Organic Carbon	Calcium Carbonate	Organic Carbon	Calcium Carbonate
1	3/Jul./2009	18	6.51	0.58	4.72	8.96	72.43
2	20/Jul./2009	18	7.98	0.76	5.07	9.54	63.52
3	6/Aug./2009	18	10.95	1.21	5.99	11.06	54.73
4	23/Aug./2009	18	11.58	0.92	8.06	7.90	69.61
5	9/Sep./2009	18	17.43	1.06	12.96	6.09	74.34
6	26/Sep./2009	18	13.73	0.78	10.53	5.69	76.67
7	13/Oct./2009	18	5.61	0.38	4.33	6.71	77.32
8	30/Oct./2009	18			no data		
9	16/Nov./2009	18	8.32	0.56	5.98	6.70	71.84
10	3/Dec./2009	18	14.85	0.48	12.60	3.23	84.81
11	20/Dec./2009	18	6.83	0.40	5.04	5.82	73.78
12	6/Jan./2010	18	4.45	0.39	2.90	8.87	65.11
13	23/Jan./2010	18	4.74	0.34	3.54	7.06	74.56
14	9/Feb./2010	18	3.22	0.32	2.16	9.86	67.04
15	26/Feb./2010	18	6.01	0.58	3.92	9.68	65.21
16	15/Mar./2010	18	4.58	0.14	3.97	3.11	86.60
17	1/Apr./2010	18	3.50	0.13	2.99	3.84	85.67
18	18/Apr./2010	18	3.72	0.31	2.73	8.37	73.59
19	5/May/2010	18	5.21	0.73	3.21	13.97	61.59
20	22/May/2010	18	4.30	0.73	2.20	16.90	51.01

Table 2. Sampling dates, fluxes and composition of sinking-particles at the in FM10 the northwestern tropical Pacific

Sample no.	Date Open (day/month/yr)	Days	Flux ( $\text{mg m}^{-2} \text{day}^{-1}$ )			% of total	
			Total mass	Organic Carbon	Calcium Carbonate	Organic Carbon	Calcium Carbonate
1	3/Jul./2009	18	10.92	1.12	7.02	10.21	64.28
2	20/Jul./2009	18	18.04	1.30	12.44	7.21	68.98
3	6/Aug./2009	18	18.79	1.36	13.21	7.24	70.30
4	23/Aug./2009	18	17.02	1.18	12.22	6.92	71.78
5	9/Sep./2009	18	33.31	2.00	25.88	6.01	77.68
6	26/Sep./2009	18	17.76	2.32	10.39	13.04	58.51
7	13/Oct./2009	18	11.49	1.12	7.26	9.71	63.15
8	30/Oct./2009	18	5.43	0.36	4.23	6.61	77.97
9	16/Nov./2009	18	6.18	0.34	5.03	5.44	81.36
10	3/Dec./2009	18	8.79	0.66	6.43	7.56	73.12
11	20/Dec./2009	18	8.58	1.06	5.18	12.40	60.36
12	6/Jan./2010	18	4.49	0.35	3.14	7.78	69.88
13	23/Jan./2010	18			no data		
14	9/Feb./2010	18			no data		
15	26/Feb./2010	18	7.51	0.52	5.13	6.95	68.36
16	15/Mar./2010	18	8.09	0.68	5.63	8.36	69.53
17	1/Apr./2010	18	8.29	0.47	6.20	5.72	74.85
18	18/Apr./2010	18	9.67	0.68	7.15	7.01	73.95
19	5/May/2010	18	7.69	0.52	5.52	6.79	71.77
20	22/May/2010	18	9.85	0.99	5.83	10.10	59.17

였다. 유기탄소(Organic carbon) 함량은 총탄소 함량에서 무기탄소 함량을 빼어 계산하였다.

### 3. 결 과

#### FM1에서 관측된 침강입자 물질플럭스의 변동

정점 FM1에서 관측된 총질량 플럭스와 생물기원 입자 플럭스는 시간에 따라 큰 변화를 보였다. 총질량 플럭스는  $3.22\text{-}17.4 \text{ mg m}^{-2} \text{ day}^{-1}$ 의 범위에서 변화하였으며, 평균값은  $7.55 \text{ mg m}^{-2} \text{ day}^{-1}$ 로 관측되었다. 총질량 플럭스의 최고값은 2009년 9월에 관측되었으며, 최저값은 2010년 2월에 나타났다(Fig. 2a). 총질량 플럭스는 계절적으로 큰 변화를 보였다. 여름철인 7-8월에는  $6.51 \text{ mg m}^{-2} \text{ day}^{-1}$ 부터  $11.6 \text{ mg m}^{-2} \text{ day}^{-1}$ 까지 점차 증가하여 가을철인 9-11월에는 높은 플럭스를 보였지만, 겨울철인 12-2월에는 점차 감소하여 봄철인 3-5월에는  $6.00 \text{ mg m}^{-2} \text{ day}^{-1}$  이하의 낮은 플럭스를 보였다(Fig. 2a). 전반적으로 총질량 플럭스는 여름-가을철인 7월-11월에  $10.0 \text{ mg m}^{-2} \text{ day}^{-1}$  내외의 값을 보였지만, 겨울-봄철인 12월-5월까지의  $5.00 \text{ mg m}^{-2} \text{ day}^{-1}$  내외의 비교적 낮은 값을 나타냈으며, 이 계절 변화는 통계적으로 유의한 차이를 나타냈다(ANOVA test: degree of freedom (df)=18, F-test statistic (F)=7.98, 유의

수준( $p$ )<0.05).

침강입자의 유기탄소 함량은 3.1-16.9%의 범위에서 변화하였고, 2010년 3월에 최소값, 2010년 5월에 최고값을 보였다. 연구기간 동안 유기탄소 함량은 전반적으로 2009년 7월부터 8월까지 증가하였고, 이 후 감소하여 2009년 12월에는 최소값을 보였으며, 다시 증가하여 2010년 5-6월에 최대값이 관측되었다(Fig. 2b). 유기탄소 플럭스는  $0.13\text{-}1.21 \text{ mg m}^{-2} \text{ day}^{-1}$ 의 범위에서 변화하였으며, 2010년 4월에 최저값과 2009년 8월에 최고값이 관측되었다(Fig. 2b). 유기탄소 플럭스는 2009년 7월부터 증가하여 8월에 최대값을 보였고, 9월 이후에는 점차 감소하여 2010년 4월에 최소값을 기록하였다. 유기탄소 플럭스는 총질량 플럭스의 계절 변화와 유사하게 여름-가을철에 비교적 높은 값( $0.78 \text{ mg m}^{-2} \text{ day}^{-1}$ , n=8)을 보인 반면, 겨울-봄철에 상대적으로 낮은 값( $0.41 \text{ mg m}^{-2} \text{ day}^{-1}$ , n=8)을 보였다.

침강입자의 탄산칼슘 함량은 51-87%의 범위를 보여 유기탄소 함량의 변화 범위보다 4배 이상 높은 값을 보였다. 최고 탄산칼슘 함량은 2010년 3월에 관측되었고, 최저 탄산칼슘 함량은 2010년 5월에 나타났다. 탄산칼슘 함량의 변화는 유기탄소 함량과는 상반된 경향을 보였으며, 이는 구성성분 함량의 상대적인 차이를 반영한 것으로 생각된다

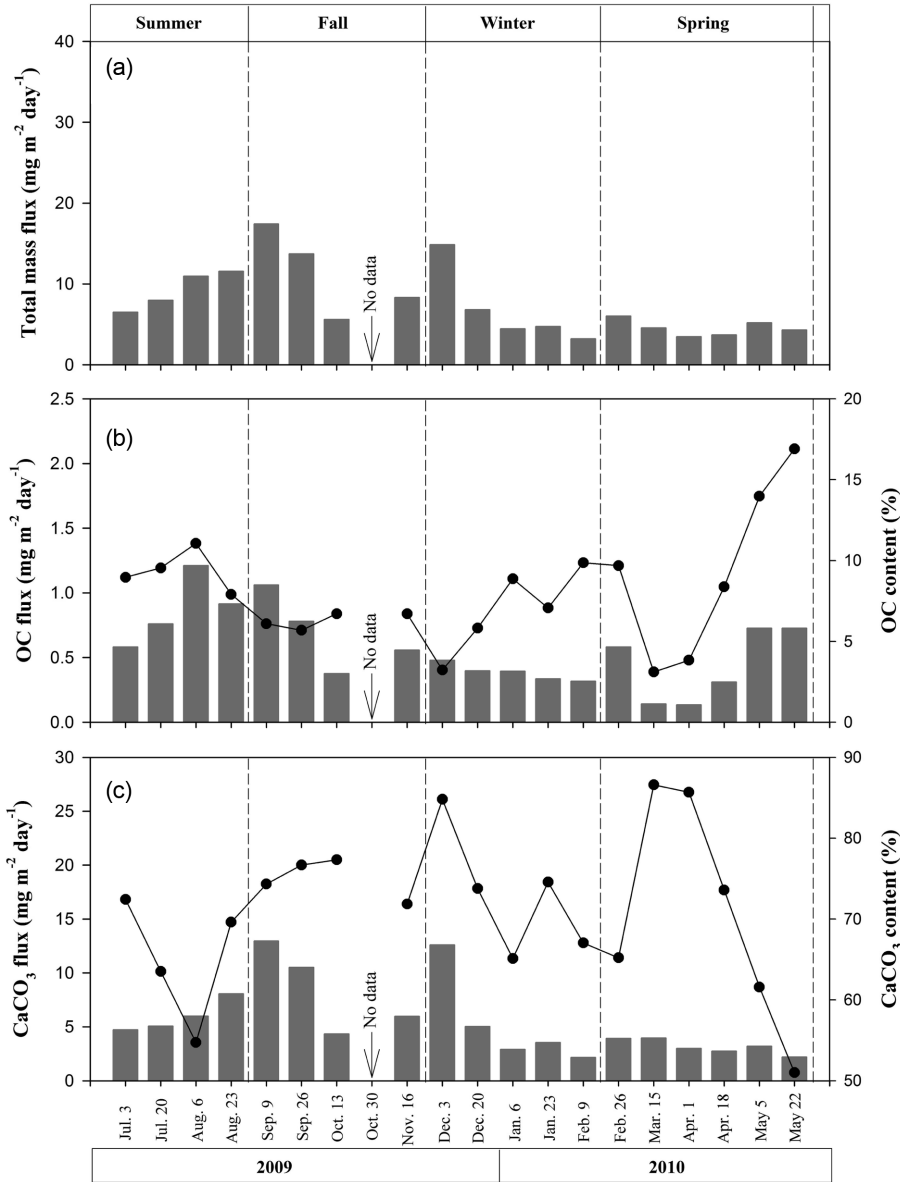


Fig. 2. Temporal variations of (a), total mass flux (b), organic carbon flux and content and CaCO<sub>3</sub> (c), flux and content at FM1 station. Vertical bars denote fluxes, line and scatter plots are contents

다(Fig. 2c). 탄산칼슘 플럭스는 2.16-13.0 mg m<sup>-2</sup> day<sup>-1</sup>의 범위에서 변화하였으며, 유기탄소 플럭스보다 약 10배 높은 값을 보였다. 최고 탄산칼슘 플럭스는 총질량 플럭스의 최고값과 같은 시기인 2009년 9월에 관측되었고, 최저값은 2010년 2월에 나타났다. 탄산칼슘 플럭스는 총질량 플럭스의 계절 변화와 유사하게 여름-가을철에 높은 값(7.20 mg m<sup>-2</sup> day<sup>-1</sup>, n=11)을 보였고, 겨울-봄철에 비교적 낮은 플럭스(4.11 mg m<sup>-2</sup> day<sup>-1</sup>, n=11)를 보였다.

**FM10에서 관측된 침강입자 물질플럭스의 변동**

연구기간 동안 정점 FM10에서 관측된 총질량 플럭스

는 정점 FM1과 유사한 시기적 변화를 보였다(Fig. 3a). 총질량 플럭스는 4.49-33.3 mg m<sup>-2</sup> day<sup>-1</sup>의 범위에서 변화하였으며, 평균값은 11.8 mg m<sup>-2</sup> day<sup>-1</sup>로 관측되었다. 관측기간 중 최고값을 보인 2009년 9월의 총질량 플럭스(33.3 mg m<sup>-2</sup> day<sup>-1</sup>)는 정점 FM1에서 2009년 9월에 관측된 최고값(17.4 mg m<sup>-2</sup> day<sup>-1</sup>)보다 2배 가량 높았다. 또한, 정점 FM10에서 관측된 총질량 플럭스는 같은 기간 동안 관측된 정점 FM1과 유사한 계절 변화를 보였다. 총질량 플럭스는 겨울-봄철에 상대적으로 낮은 값(8.11 mg m<sup>-2</sup> day<sup>-1</sup>, n=9)을 보인 반면, 여름-가을철에 비교적 높은 값(15.4 mg m<sup>-2</sup> day<sup>-1</sup>, n=9)을 보였으며, 통계적으로도

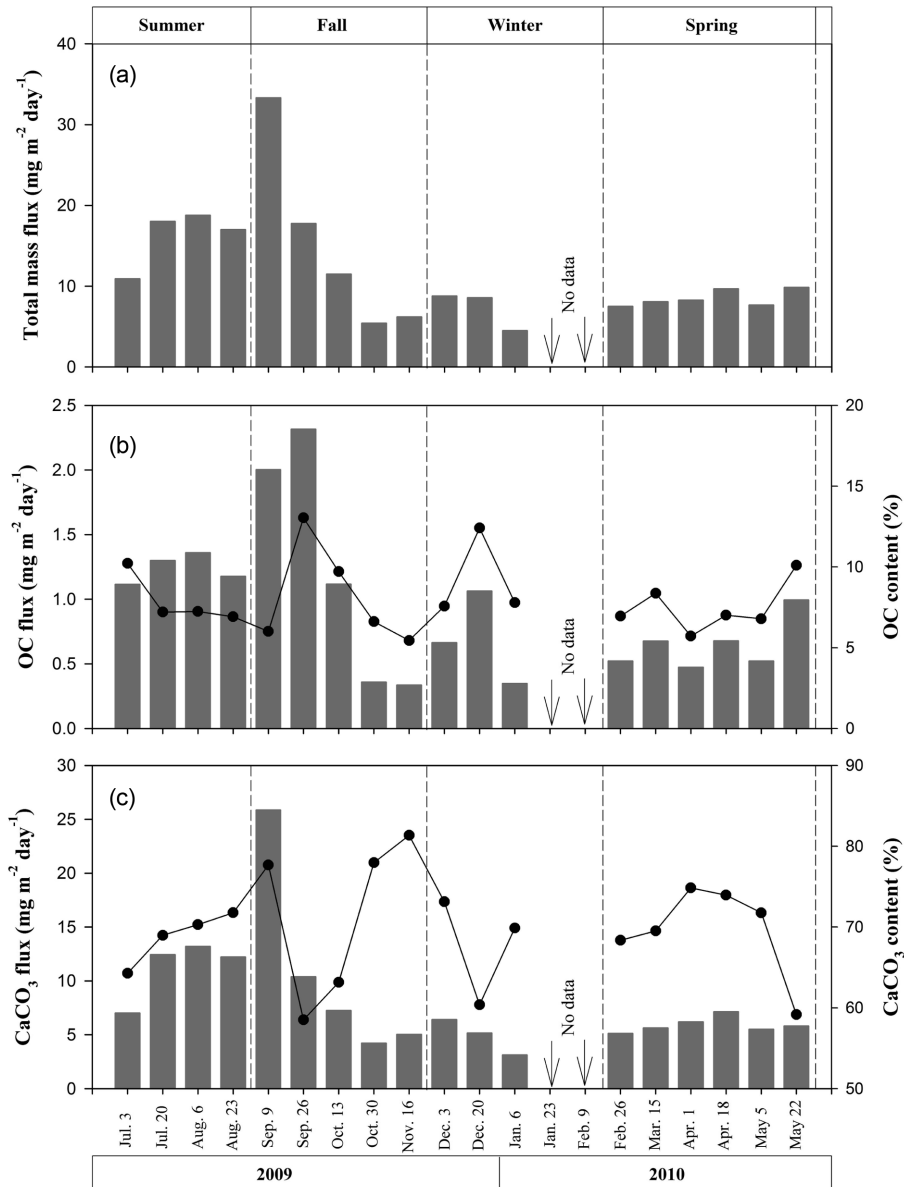


Fig. 3. Temporal variations of (a), total mass flux (b), organic carbon flux and content and  $\text{CaCO}_3$  (c), flux and content at FM10 station. Vertical bars denote fluxes, line and scatter plots are contents

유의한 차이를 나타냈다(ANOVA test:  $df=17$ ,  $F=6.59$ ,  $p<0.05$ ). 유기탄소 플럭스는 2009년 11월에 나타난 가장 낮은 값인  $0.34 \text{ mg m}^{-2} \text{ day}^{-1}$ 와 2009년 9월에 측정된 가장 높은 값인  $2.32 \text{ mg m}^{-2} \text{ day}^{-1}$  사이에서 변화하였으며, 여름-가을철( $1.2 \text{ mg m}^{-2} \text{ day}^{-1}$ ,  $n=9$ )에 높고, 겨울-봄철( $0.7 \text{ mg m}^{-2} \text{ day}^{-1}$ ,  $n=9$ )에 낮은 뚜렷한 계절 변화를 보였다(Fig. 3b). 탄산칼슘 플럭스는  $3.14\text{-}25.9 \text{ mg m}^{-2} \text{ day}^{-1}$ 의 범위에서 변화하였으며, 2009년 9월에 가장 높은 값과 2010년 1월에 가장 낮은 값이 관측되었다(Fig. 3c). 탄산칼슘 플럭스는 총질량 플럭스와 유사하게 여름-가을철에

상대적으로 높은 값( $10.9 \text{ mg m}^{-2} \text{ day}^{-1}$ ,  $n=9$ )을 보인 반면, 겨울-봄철에 비교적 낮은 값( $5.58 \text{ mg m}^{-2} \text{ day}^{-1}$ ,  $n=9$ )을 나타냈다.

정점 FM10에서 관측된 유기탄소 함량은 정점 FM1과 유사하게 5-14%의 변화범위를 보였으며, 2009년 11월에 가장 낮은 함량을, 2009년 9월에 가장 높은 함량을 보였다. 탄산칼슘 함량은 정점 FM1과 유사하게 58-82%의 변화범위를 보여 정점 FM10에서 획득된 침강입자의 대부분은 주로 탄산칼슘 기원의 물질로 구성된 것으로 나타났다(Fig. 3b and c).

#### 4. 토 의

수층 내 침강입자는 주로 해양생물기원 입자와 육상기원 쇄설물 입자로 구성되며, 태평양과 같은 대양환경에서의 침강입자는 대부분 해양생물기원 입자들로 구성된다 (Dymond and Collier 1988; Honjo et al. 1995; Collier et al. 2000; Kawahata and Gupta 2004; Kim et al. 2010; Kim et al. 2011). 해양생물기원 원소들은 주로 탄산칼슘, 생기원규소, 유기탄소로 구분된다(Honjo et al. 1982; Kim et al. 2002; Kim et al. 2010). 본 연구의 두 정점에서 관측된 침강입자의 탄산칼슘 함량은 50-85%를 차지하여 생물기원 구성성분 중 가장 많은 양을 구성하였으며, 유기탄소 함량은 3-17%의 범위를 보였다. 시계열 퇴적물 포집장치를 이용하여 태평양 적도해역과 아열대 해역에서 수행된 이전 연구결과에 따르면, 침강입자의 생물기원 구성성분 중에서 탄산칼슘 함량이 가장 많은 양을 차지한다고 보고하였다(Dymond and Collier 1988; Honjo et al. 1995; Kawahata 2002; Mohiuddin et al. 2002; Kawahata and Gupta 2004; Kim et al. 2010; Kim et al. 2011). 특히, 본 연구해역을 포함하는 서태평양 적도해역과 아열대 해역에서 관측된 탄산칼슘 함량은 30-80%를 차지하고, 유기탄소 함량은 5-15%를 차지한다고 보고하여 본 연구결과와 유사한 값을 나타냈다(Kawahata et al. 2000; Kawahata 2002; Mohiuddin et al. 2002; Kawahata and Gupta 2004; Kim et al. 2010). 또한, 본 연구의 두 정점에서 관측된 탄산칼슘 플럭스는 총질량 플럭스의 시기적 변화와 매우 높은 상관관계(FM1:  $R=0.98$ , FM10:  $R=0.99$ )를 보였다. 따

라서 본 연구해역의 두 정점에서 관측된 침강입자 플럭스는 주로 탄산칼슘으로 구성된 해양생물의 영향을 받는 것으로 생각된다.

본 연구의 서태평양 아열대 해역 내에 위치한 정점 FM1과 FM10에서 관측된 평균 총질량 플럭스는 각각  $7.55 \text{ mg m}^{-2} \text{ day}^{-1}$ 와  $11.8 \text{ mg m}^{-2} \text{ day}^{-1}$ 로 나타났다. 이는 서태평양 적도해역(Site 1, 2)에서 보고된 총질량 플럭스( $97\text{-}160 \text{ mg m}^{-2} \text{ day}^{-1}$ )에 비해 1/10 가량으로 낮았으며, 서태평양 중위도 해역(WCT-3)에서 관측된 총질량 플럭스( $36.4 \text{ mg m}^{-2} \text{ day}^{-1}$ )에 비해서도 1/3 가량으로 낮았다(Fig. 4). 이러한 해역에 따른 침강입자 플럭스의 차이는 일차생산성의 급격한 변화를 잘 반영한다고 알려져 있으며(Kawahata et al. 1998), 해역별 침강입자 플럭스와 일차생산성의 차이는 엽록소 농도, 수층 내 영양염 농도의 위도별 변화와 잘 일치한다(e.g., Furuya 1990; Messié and Radenac 2006). Furuya (1990)의 연구에 의하면, 서태평양 적도해역에서 관측한 수심 100 m 이내 영양염 농도는 아열대 해역에 비해 높게 나타났으며, 서태평양 적도해역의 수온약층 깊이도 100 m 이내에 존재하여 아열대 해역보다 얇은 수심에 발달한다고 보고하였다. 또한, 인공위성(SeaWiFS; Sea-viewing Wide Field-of-view Sensor)을 이용하여 관측한 표층해양의 엽록소 농도와 수심 100 m 이내의 현장에서 관측한 엽록소 농도는 서태평양 적도해역에서 가장 높게 관측되며, 아열대 해역의 엽록소 농도는 적도해역에 비해 상대적으로 낮게 관측되었다(Furuya 1990; Messié and Radenac 2006). 따라서 서태평양 아열대 해역의 입자 플럭스는 적도해역과 중위도 해역보다 낮

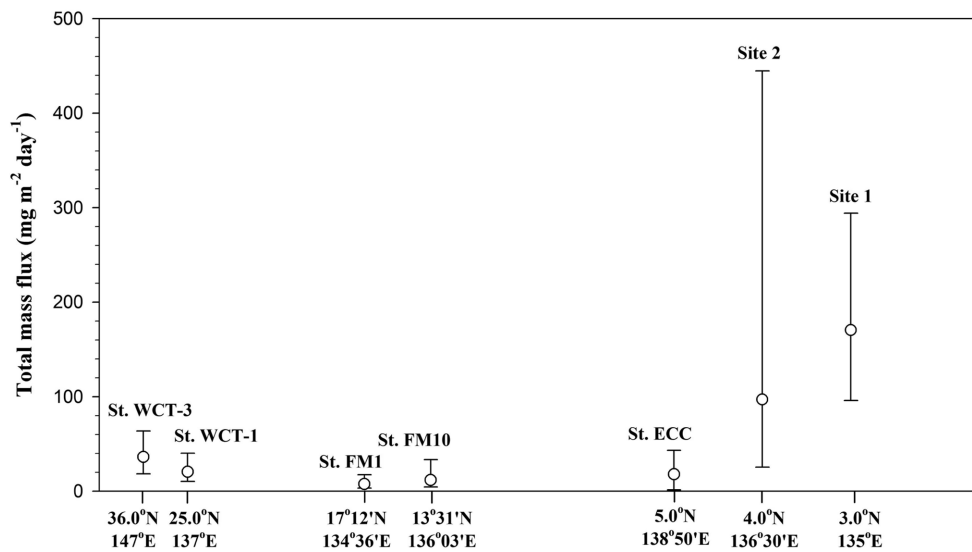
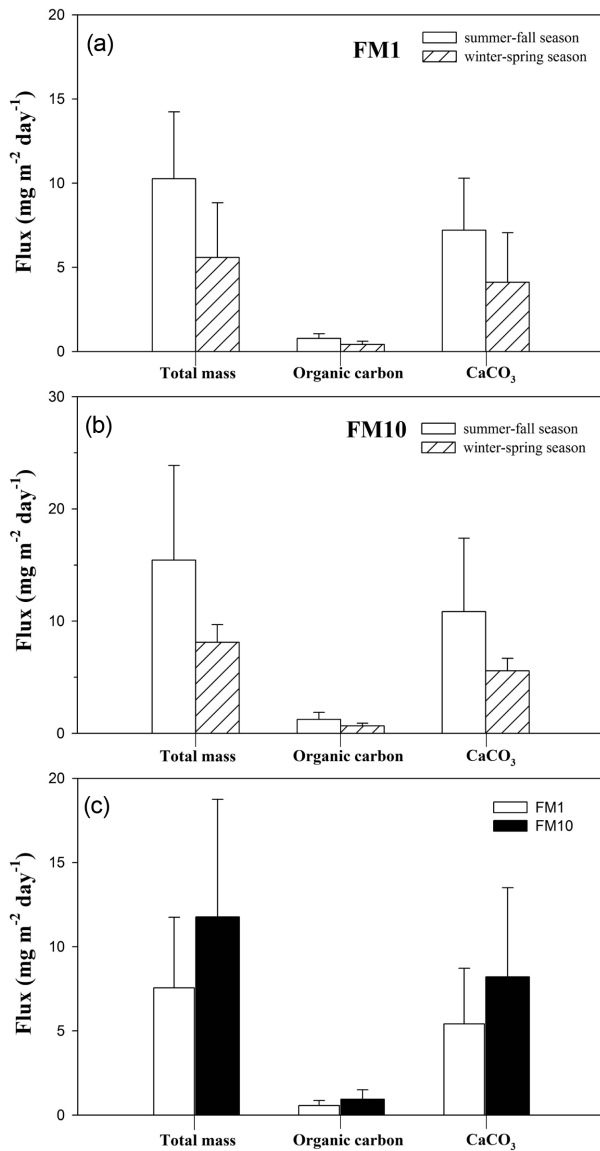


Fig. 4. Total mass fluxes measured in the northwestern equatorial and subtropical Pacific Ocean. Circles represent the average total mass fluxes throughout the periods deployed. Bars represent the entire range of total mass fluxes. Sites 1 and 2 from Kawahata et al. (2000), ST. ECC from Kempe and Knaack (1996), ST. WCT-1 and 3 from Mohiuddin et al. (2004)



**Fig. 5.** Average fluxes of total mass, organic carbon, and CaCO<sub>3</sub> at (a), FM1 and (b), FM10, during summer-fall (June-November), and winter-fall (December-May) seasons. Average fluxes of total mass, organic carbon, and CaCO<sub>3</sub> at FM1 and FM10 (c). Vertical solid bars denote standard deviation

은 값을 보였으며, 이는 해역별 일차생산성과 엽록소 농도의 차이를 잘 반영한 것으로 해석된다.

정점 FM1과 FM10에서 관측된 총질량 플럭스는 서로 유사한 계절변화를 보였다(Fig. 5a, b). 일반적으로, 수심 약 1,000 m에서 관측된 침강입자 플럭스의 계절변화는 일차생산성과 생물군집의 계절변화를 잘 반영하는 것으로 알려져 있다(e.g., Dymond and Collier 1988; Hakke et al. 1993; Honjo et al. 1995; Rixen et al. 1996; Kawahata et

al. 1998; Kawahata 2002). 특히, 두 정점에서 관측된 생물기원 플럭스의 계절변화가 서로 유사하게 관측된 것은 서태평양 아열대 해역 내에서 해양생물 군집과 생물 활동이 지역적으로 큰 차이를 보이지 않는다는 것을 반영한다. 해양 일차생산성과 생물군집의 계절변화는 엽록소 농도의 계절 변화와 밀접한 연관이 있으며, 최근 많은 연구에서는 인공위성을 이용하여 광범위하고 장기간의 엽록소 농도 관측을 수행하고 있다(Chavez et al. 1999; Dandonneau et al. 2004; Messié and Radenac 2006). Messié and Radenac (2006)의 연구에 의하면, 서태평양 아열대 해역에서 인공위성을 이용하여 1999년부터 2004년까지 관측한 표층해양의 엽록소 농도는 여름-가을철 (0.1 mg m<sup>-3</sup>)에 높았고, 겨울-봄철(0.06 mg m<sup>-3</sup>)에 비교적 낮은 계절 변화를 보였다. 이러한 엽록소 농도의 계절 변화는 본 연구에서 관측된 침강입자 총질량 플럭스의 계절 변화와 잘 일치한다. 따라서 본 연구해역의 두 정점에서 관측된 침강입자 총질량 플럭스와 생물기원 플럭스의 뚜렷한 계절 변화는 표층해양 생물활동의 계절변화를 잘 반영하는 것으로 해석된다. 표층해양 엽록소 농도의 계절 변화뿐만 아니라, 시계열 퇴적물 포집장치를 이용하여 서태평양 적도해역과 아열대 해역에서 수행된 Kempe and Knaack (1996)와 Mohiuddin et al. (2002)의 연구에서도 본 연구결과와 유사한 입자 플럭스의 계절변화를 보고하였다. Mohiuddin et al. (2002)은 1997년 12월부터 1999년 7월까지 서태평양 아열대 해역의 북쪽 지역(WCT-1; 25°N, 137°E)에서 약 20개월 동안 입자 플럭스를 관측하였는데, 여름-가을철의 총질량 플럭스는 겨울-봄철에 관측한 값에 비해 높게 관측되었으며, 이러한 총질량 플럭스의 계절변화는 해양의 생물기원 탄산칼슘을 구성하는 부유성 유공충 플럭스의 계절변화에 의한 영향이라고 해석하였다. 이들의 연구에서 관측된 부유성 유공충의 개체수와 플럭스는 6-8월에 가장 높은 값을 보였으며, 1-3월에 가장 낮은 값을 보여 본 연구의 정점 FM1과 FM10에서 관측된 탄산칼슘 플럭스의 뚜렷한 계절변화 경향과 그 시기가 잘 일치한다. 따라서 서태평양 아열대 해역 내에 위치한 정점 FM1과 FM10에서 관측된 침강입자 플럭스의 계절 변화는 탄산칼슘을 구성하는 표층해양 생물들의 계절 변화에 의한 영향으로 생각되며, 특히 부유성 유공충 플럭스의 뚜렷한 계절 변화에 의해 야기된 것으로 생각된다.

본 연구의 두 정점에서 관측된 침강입자 플럭스는 시간에 따라 유사한 변화를 보였지만, 위치에 따라 뚜렷한 양적 차이를 나타냈다(Fig. 5c). 난수역 북쪽 주변부에 위치한 정점 FM10에서 관측된 총질량 플럭스는 쿠로시오 발원지에 위치한 정점 FM1에서 관측된 값보다 약 56% 높은 값을 보였다. 정점 FM10에서 유기탄소와 탄산칼슘 플럭스도 정점 FM1 보다 50-67% 높은 값을 보였다. 특



히, 두 정점 간의 탄산칼슘 플럭스 차이는 총질량 플럭스 차이의 약 67%를 차지하여 본 연구해역 내 위치에 따른 침강입자 플럭스의 차이는 주로 탄산칼슘 플럭스 차이에 의한 영향으로 생각된다. 서태평양 적도해역과 아열대 해역의 탄산칼슘 플럭스는 인편모조류(Coccolithophore)와 부유성 유공충의 개체수 변화에 영향을 받는 것으로 알려져 있으나, 인편모조류 보다는 부유성 유공충 플럭스 변화에 큰 영향을 받는 것으로 보고되었다(Tanaka and Kawahata 2001; Mohiuddin et al. 2002, 2004; Yamasaki et al. 2008). 또한, 서태평양 적도해역과 아열대 해역의 부유성 유공충 플럭스는 위도 차이에 따라 양적 차이를 보이는 것으로 알려져 있다(Mohiuddin et al. 2002; Yamasaki et al. 2008). 실제로 서태평양 적도해역 내 두 정점에서 시계열 퇴적물 포집장치를 이용한 Yamasaki et al. (2008)의 연구에 따르면, 북위 4도에 위치한 정점(MT1; 4°N, 135°E)에서 관측된 부유성 유공충 개체수와 플럭스는 적도에 위치한 정점(MT3; 0°, 145°E) 보다 높게 나타났다고 보고하였으며, 이 부유성 유공충 플럭스의 차이는 두 지역 간 영양염 공급의 차이를 반영한 것으로 설명하였다. 따라서 본 연구해역의 두 정점 간, 탄산칼슘 플럭스의 차이는 부유성 유공충 플럭스의 차이를 반영하는 것으로 생각되며, 이는 서태평양 아열대 해역 내 위치에 따른 일차생산성, 수층 내 영양염의 차이를 반영한 결과로 해석된다. 아울러 서태평양 아열대 해역에서 해양환경변화에 의한 해양생태계 군집, 입자 플럭스 변화 등을 보다 정확히 파악하기 위해서는 시계열 퇴적물 포집장치를 이용한 장기 모니터링이 반드시 필요하며, 필수적임을 제안한다.

## 5. 결 론

2009년 7월부터 2010년 6월까지 약 1년 동안 서태평양 아열대 해역 내 두 정점에서 관측한 입자 플럭스는 뚜렷한 계절변화를 보였으며, 두 정점 간 입자 플럭스의 차이를 보였다. 이들을 종합해 보면 다음과 같이 요약할 수 있다.

- 1) 서태평양 아열대 해역 난수역 북쪽 주변부에 위치한 정점 FM10과 쿠로시오 해류의 영향권에 위치한 정점 FM1에서 관측된 침강입자 플럭스는 여름-가을철에 높았고, 겨울-봄철에 상대적으로 낮은 뚜렷한 계절변동을 보였다.
- 2) 두 정점에서 관측된 침강입자 물질플럭스의 계절변동은 주로 탄산칼슘 플럭스의 계절변동에 의해 야기된 것을 해석되며, 이 탄산칼슘 플럭스의 계절변동은 부유성 유공충 플럭스와 개체수의 변동에 의한 것으로 생각된다.
- 3) 쿠로시오 발원지인 정점 FM1보다 난수역 북쪽 주변

부 위치한 FM10에서 총질량 플럭스가 높게 관측되었다. 이는 해역에 따른 일차생산성과 부유성 유공충 플럭스의 차이를 반영한 것으로 해석된다.

## 사 사

이 연구는 “북서태평양이 한반도 주변해에 미치는 영향 연구(PE98563)”와 “태평양 권역별 해저환경특성 및 고환경복원 연구(PE98662)”의 일환으로 수행되었다.

## 참고문헌

- Chavez FP, Strutton PG, Friederich GE, Feely RA, Feldman GC, Foley DG, McPhaden MJ (1999) Biological and chemical response of the Equatorial Pacific Ocean to the 1997-98 El Niño. *Science* **286**:2126-2131
- Collier R, Dymond J, Honjo S, Manganini S, Francois R, Dunbar R, (2000) The vertical flux of biogenic and lithogenic material in the Ross Sea: moored sediment trap observations 1996-1998. *Deep-Sea Res II* **47**:3491-3520
- Dandonneau Y, Deschamps PY, Nicolas JM, Loisel H, Blanchot J, Montel Y, Thieuleux F, Bécu G (2004) Seasonal and interannual variability of ocean color and composition of phytoplankton communities in the North Atlantic, equatorial Pacific and South Pacific. *Deep-Sea Res II* **51**:303-318
- Dymond J, Collier R (1988) Biogenic particle fluxes in the equatorial Pacific: evidence for both high and low productivity during the 1982-1983 El Niño. *Global Biogeochem Cy* **2**:129-137
- Furuya K (1990) Subsurface chlorophyll maximum in the tropical and subtropical western Pacific Ocean: vertical profiles of phytoplankton biomass and its relationship with chlorophyll a and particulate organic carbon. *Mar Biol* **107**:529-539
- Garidel-Thoron T, Rosenthal Y, Bassinot F, Beaufort L (2005) Stable sea surface temperatures in the western Pacific warm pool over the past 1.75 million years. *Nature* **433**:294-298
- Gupta LP, Kawahata H (2002) Impact of ENSO variability on the flux and composition of sinking POM in the western equatorial Pacific Ocean: Amino acids and hexosamines. *Deep-Sea Res II* **49**:2769-2782
- Haake B, Ittekkot V, Rixen T, Ramaswamy V, Nair RR, Curry WB (1993) Seasonality and interannual variability of particle fluxes to the deep Arabian Sea. *Deep-Sea Res I* **40**:1323-1344

- Honda MC, Kawakami H, Sasaoka K, Watanabe S, Dickey T (2006) Quick transport of primary produced organic carbon to the ocean interior. *Geophys Res Lett* **33**:L16603
- Honjo S, Manganini S, Cole JJ (1982) Sedimentation of biogenic matter in the deep ocean. *Deep-Sea Res* **29**:609-625
- Honjo S, Dymond J, Collier R, Manganini SJ (1995) Export production of particles to the interior of the equatorial Pacific Ocean during the 1992 EqPac experiment. *Deep-Sea Res II* **42**:831-870
- Hsieh CH, Chiu TS, Shih C (2004) Copepod diversity and composition as indicators of intrusion of the Kuroshio branch current into the Northern Taiwan Strait in spring 2000. *Zool Stud* **43**:393-403
- Jian Z, Wang P, Saito Y, Wang J, Pflaumann U, Oba T, Cheng X (2000) Holocene variability of the Kuroshio current in the Okinawa Trough, northwestern Pacific Ocean. *Earth Planet Sc Lett* **184**:305-319
- Karl DM, Christian JR, Dore JE, Hebel DV, Letelier RM, Tupas LM, Winn CD (1996) Seasonal and interannual variability in primary production and particle flux at Station ALOHA. *Deep-Sea Res II* **43**:539-568
- Kawahata H, Yamamuro M, Ohta H (1998) Seasonal and vertical variations of sinking particle fluxes in the West Caroline Basin. *Oceanol Acta* **21**:521-532
- Kawahata H, Suzuki A, Ohta H (2000) Export fluxes in the Western Pacific Warm Pool. *Deep-Sea Res I* **47**:2061-2091
- Kawahata H (2002) Suspended and settling particles in the Pacific. *Deep-Sea Res II* **49**:5647-5664
- Kawahata H, Gupta LP (2003) El Niño/Southern Oscillation (ENSO) Related Variations in Particulate Export Fluxes in the Western and Central Equatorial Pacific. *J Oceanogr* **59**:663-670
- Kawahata H, Gupta LP (2004) Settling particles flux in response to El Niño/Southern Oscillation (ENSO) in the Equatorial Pacific. In: Shiyomi et al (eds) *Global Environmental Change in the Ocean and on Land*. Terrapub, Tokyo, pp 95-108
- Kempe S, Knaack H (1996) Vertical particle flux in the Western Pacific below the North Equatorial Current and the Equatorial Counter Current. in *Particle Flux in the Ocean*. In: Ittekkot V, Schafer P, Honjo S, Depetris PJ (eds) *Particle flux in the ocean*, John Wiley & Sons, pp 313-323
- Kim D, Kim DY, Kim YJ, Kang YC (2002) Seasonal variations of particle fluxes in the Bransfield Strait, Antarctica. *Ocean and Polar Res* **24**:153-166
- Kim HJ, Hyeong K, Yoo CM, Chi SB, Khim BK, Kim D (2010) Seasonal variations of particle fluxes in the northeastern equatorial Pacific during normal and weak El Niño periods. *Geosci J* **14**:415-422
- Kim HJ, Kim D, Yoo CM, Chi SB, Khim BK, Shin HR, Hyeong K (2011) Influence of ENSO variability on sinking-particle fluxes in the northeastern equatorial Pacific. *Deep-Sea Res I* **58**:865-874
- Kuroyanagi A, Kawahata H, Nishi H, Honda M (2008) Seasonal to interannual changes in planktonic foraminiferal assemblages in the northwestern North Pacific: Sediment trap results encompassing a warm period related to El Niño. *Palaeogeogr Palaeoclimatol* **262**:107-127
- McPhaden MJ, Picaut J (1990) El Niño Southern oscillation displacements of the western equatorial Pacific warm pool. *Science* **270**:1385-1388
- Messié M, Radenac MH (2006) Seasonal variability of the surface chlorophyll in the western tropical Pacific from SeaWiFS data. *Deep-Sea Res I* **53**:1581-1600
- Mohiuddin MM, Nishimura A, Tanaka Y, Shimamoto A (2002) Regional and interannual productivity of biogenic components and planktonic foraminiferal fluxes in the northwestern Pacific Basin. *Mar Micropaleontol* **45**:57-82
- Mohiuddin MM, Nishimura A, Tanaka Y, Shimamoto A (2004) Seasonality of biogenic particle and planktonic foraminifera fluxes: response to hydrographic variability in the Kuroshio Extension, northwestern Pacific Ocean. *Deep-Sea Res I* **51**:1659-1683
- Okazaki Y, Takahashi K, Onodera J, Honda M (2005) Temporal and spatial flux changes of radiolarians in the northwestern Pacific Ocean during 1997-2000. *Deep-Sea Res II* **52**:2240-2274
- Picaut J, Delcroix T (1995) Equatorial wave sequence associated with warm pool displacement during the 1986-1989 El Niño-La Niña. *J Geophys Res* **100**:18393-18408
- Picaut J, Hackert E, Busalacchi AJ, Murtugudde R, Lagerloef GSE (2002) Mechanisms of the 1997-1998 El Niño-La Niña, as inferred from space-based observations. *J Geophys Res* **107**:3037. doi: 10.1029/2001jc000850
- Pickard GL, Emery WJ (1982) *Descriptive Physical Oceanography*. Pergamon Press, Oxford, 45 p
- Qiu B, Lukas R (1996) Seasonal and interannual variability of the North Equatorial Current, the Mindanao Current, and the Kuroshio along the Pacific western boundary. *J Geophys Res* **101**:12315-12330
- Radenac MH, Rodier M (1996) Nitrate and chlorophyll distributions in relation to thermohaline and current structures in the western tropical Pacific during 1985-

1989. *Deep-Sea Res II* **43**:725-752
- Rixen T, Haake B, Ittekkot V, Gupta MVS, Nair RR, Schlüssel P (1996) Coupling between SW monsoon-related surface and deep ocean processes as discerned from continuous particle flux measurements and correlated satellite data. *J Geophys Res* **101**:28569-28582
- Takahashi K, Onodera J, Katsurada Y (2009) Relationship between time-series diatom fluxes in the central and western equatorial Pacific and ENSO-associated migrations of the Western Pacific Warm Pool. *Deep-Sea Res I* **56**:1298-1318
- Tanaka Y, Kawahata H (2001) Seasonal occurrence of coccoliths in sediment traps from west Caroline Basin, equatorial West Pacific Ocean. *Mar Micropaleontol* **43**:273-284
- Thunell R, Anderson D, Gellar D, Miao Q (1994) Sea-surface temperature estimates for the tropical western Pacific during the last glacial and their implications for the Pacific warm pool. *Quart Res* **41**:255-264
- Yamasaki M, Sasaki A, Oda M, Domitsu H (2008) Western equatorial Pacific planktonic foraminiferal fluxes and assemblages during a La Niña year (1999). *Mar Micropaleontol* **66**:304-319
- Yan XH, Ho CR, Zheng Q, Klemas V (1992) Temperature and size variabilities of the western Pacific warm pool. *Science* **258**:1643-1645

---

*Received Jul. 6, 2011*

*Revised Aug. 10, 2011*

*Accepted Sep. 9, 2011*