

한국서해 반월조간대 연성저질에 서식하는
저서동물군집에 대한 오염의 영향

Pollution Effects on Benthic Infaunal Community in an
Intertidal Mud Flat of Panwol on the West Coast of Korea

1993. 4.

한국해양연구소

제 출 문

해양연구소장 귀하

본 보고서를 “한국서해 반월조간대 연성저질에 서식하는 저서동물군집에 대한 오염의 영향”의 최종보고서로 제출합니다.

1993년 3월 31일

한국해양연구소

연구책임자: 안 인영
강 영철

연구원: 최 진우

연구조원: 원 승재
윤 혜온

요 약

서해안 경기만에 위치하는 공업단지로부터 유출되는 산업폐기물에 의한 조간대 환경변화와 오염의 종류를 파악하기 위한 목적으로, 반월공단 폐수 처리장으로부터 먼 한 곳 (St. A) 그리고 가까운 두 곳 (St. B와 St. C)에 조사정점을 정하여, 1993년 7월부터 8월사이에 각 조사정점에서 저서동물과 퇴적물을 채집하였다. 군집의 특성과 서식지의 물리 화학적 특성, 그리고 중금속에 의한 오염실태를 파악하고, 중금속오염과 그 속에서 서식하는 생물군집의 변화와의 연관성을 조사하였다.

저서동물군집은 공단이 들어서기 이전인 1985년 조사결과와 비교해 볼 때, 종조성과 종밀도에서 현격한 변화를 보여주고 있다. 거의 모든 지역에서 대부분의 종들이 전멸하고 개체수 및 총생물량이 격감했으며, 오염원에서 먼 곳과 가까운 곳에 완전히 다른 종이 출현하고 있다. St. A 에는 이전에 펄속에 서식하던 저서동물들 (macroinfauna)이 거의 사라지고, 대형다모환충류인 *Perinereis aibuhitensis*와 mobile epifauna인 십각류만 남아 있다. St. A 상조간대에는 또한 1991년 말까지만 하여도 현화식물인 *Sweda* (해홍나물)가 번성하였으나 이제는 자취를 감추었다. St. B와 St. C에는 *P. aibuhitensis*를 포함하여 이전에 서식하던 저서동물들이 완전히 사라지고, 대신 oppertunistic species로 알려진 소형의 다모환충류 *Heteromastus filiformis*가 독점하고 있다. St. A와 St. B 하조간대에는 육안적으로 볼 수 있는 macroinfauna는 전혀 출현하지 않는 반면 nematodes와 *H. filiformis juveniles*과 같은 meiofauna가 다수 출현하고 있다. 특히 nematodes는 모든 정점에서 출현하며 특히 St. B 중하조간대에서 높은 밀도를 보이고 있다. 흥미로운 것은 *Heteromastus filiformis*의 경우 adult는 전 조사정점의 상조간대와 중조간대에만 출현하고, juveniles은 하조간대에 서만 다수 출현하고 있다.

일반적으로 St. A의 퇴적물이 St. B나 St. C에서보다 유기물과 염류소함량이 높는데, 이는 St. A 펄이 sand함량이 적고 점토함량이 큰것과 어느정도 상관관계가 있다. 그러나, St. A 하조간대 펄의 경우 St. B 중조간대 펄과 점토함량이 유사함에도 불구하고, 유기물함량은 St. A 하조간대 펄이 훨씬 높은 것으로 보아서, 점토함량 이외에, 또 다른 유기물함량을 결정하는 인자가 있는 것으로 사료된다.

예측과는 달리, 공단에서 가장 먼 조사정점, St. A의 중금속함량이공단 부근인 St. B 나 St. C에서보다 높았다. 이는 앞에서 설명한 바와 같이 점토함량이 높은 것과 어느정도 상관관계가 있다. 중금속들이 조립질보다는 세립질인 점토광물에 더 잘 흡착되어, 결과적으로 가장 먼 안쪽에 위치한 St. A에서 중금속함량이 높게 나타난 것으로 사료된다. Cu, Zn, Cr, Cd등은 표층에 가까울수록 점점 농도가 높게 나타나고 있어, 최근 이 지역에 Cu, Zn, Cr, Cd등이 계속 유입되고 있음을 시사하고 있다. 특히 Cu, Zn는 오염이 되지않은 다른 서해안 조간대 지역과 비교해 보면 10배 이상 높게 나타나고 있다.

St. A에서 우점종으로 출현하는 *Perinereis aibuhitensis*는 Zn, Cu, Cd을, St. B에서 우점종으로 출현하는 *Heteromastus filiformis*는 Mn, Cu를 체내에 축적하는 것으로 나타났는데, 특히 *H. filiformis*의 체내 Cu함량은 서식지 표층퇴적물에서보다 4배 이상에 달하고 있다. *P. aibuhitensis*는 우리나라 연안의 갯벌에, 그리고 *H. filiformis*는 온대수역 펄조간대에 널리 분포하는 전세계적 종으로서, 두 종 모두 중금속오염연구를 위한 지표종으로 가치가 있는 것으로 사료된다.

이상과 같이 빈약해진 생물상, 일부 우점종의 소멸과 더불어 기회종의 다수출현 등을 볼 때 본 조사해역의 저서동물군집이 환경악화로 많은 피해를 받고 있음을 알 수 있다. 본 연구지역으로 상당량의 중금속이 유입되고, 몇 가지 중금속은 생물체내에 축적되는 것은 사실이나, 중금속오염이 가장 심한 St. A 상조간대에 저서생물량이 가장 높은 것으로 볼 때, 중금속오염이 전술한 바와 같은 격심한 군집변화를 초래한 결정적 요인은 아닌 것 같다. 특히 공단부근에 이전에 저서동물군집의 주요구성원이었던 대형다모환충류나 이매패류가 전멸한 원인으로 organochlorines과 같은 유기독성물질을 의심해 볼 수 있으나, 정확한 군집저해요인에 대해서는 구체적인 연구가 요구된다.

SUMMARY

Environmental changes due to influx of industrial wastes and the kinds of pollutants were investigated in Panwol intertidal mudflat. Benthic animals and sediment were sampled from two stations (Sts. B and C) proximal to the source of waste disposal and one station distant (St. A) from the source from July through August 1992. Relations between the physico-chemical properties and heavy metal contents of the sediment and the spatial distribution of infauna were studied.

There was a dramatic change in species composition and density compared to the community before the construction of the industrial complex. Species number and density greatly decreased in all stations. At St. A the majority of the previously dominant species disappeared except the polychaete *Perinereis aibuhitensis*. The density of *P. aibuhitensis*, however, sharply decreased from 80-90 ind./m² to 14 ind./m². Sts. B and C were devoid of any preexisting infaunal species and monopolized by the opportunistic polychaete *Heteromastus filiformis*. At the lower intertidal zone of Sts. A and B nematodes and the juveniles of *H. filiformis* and *Pseudopolydora* sp. were present in a great number.

The increases of Cu, Zn, Cr, Cd concentration toward sediment surface indicate the continuous input of these heavy metal species for the recent years. In particular, Cu and Zn concentrations were approximately 10 times higher than the values in unpolluted intertidal sediment of other areas. *Perinereis aibuhitensis* accumulated Zn, Cu and Cd, and *Heteromastus filiformis* accumulated Mn and Cu in their tissues. In particular, Cu concentration in *H. filiformis* was approximately 4 times higher than the value in the surrounding sediment. Since *P. aibuhitensis* is widely distributed in the intertidal mudflats of Korea and *H. filiformis* is a cosmopolitan species occurring in intertidal mudflats in temperate waters, both polychaete species can be used as valuable indicator species in environmental monitoring studies.

Organic matter and heavy metal concentrations were higher at St. A sediment than St. B or St. C sediment, which was to some extent related to the higher mud content at St. A. Thus heavy metals are apparently not the cause for the destruction of all preexisting infauna followed by the colonization of the opportunistic species in Sts. B and C. Sediment organic matter content changed little compared to the values before the construction of the industrial complex.

The results of this study suggest that the dramatic changes in the benthic communities are apparently related to the construction of the industrial complex. However, neither heavy metal pollution or organic enrichment is likely the primary cause for the changes. Further studies on other pollutant such as organochlorines are required to clarify the causes in this area.

목차

I. 서론	17
II. 연구대상지역	18
III. 재료 및 방법	18
1. 시료채집 및 처리	18
2. 퇴적물의 유기물, 엽록소함량 및 입도 분석	19
3. 중금속 분석	20
1) 퇴적물	
2) 저서동물	
IV. 결과	21
1. 퇴적물의 물리 화학적 특성	21
1) 입도	
2) 유기물 및 Chlorophyll a/Phaeopigments 함량	
3) 중금속함량	
2. 저서동물군집의 특성	22
1) 종조성 및 빈도수	
2) 생물체내 중금속함량	
V. 고찰	23
VI. 참고문헌	26

CONTENTS

List of Figures	11
List of Tables	15
I. Introduction	17
II. Study Area	18
III. Materials and Methods	18
1. Sampling and Treatments	18
2. Analysis of sediment organic matter, chlorophyll a and grain size	19
3. Analysis of heavy metals	20
1) Sediment	
2) Benthic fauna	
IV. Results	21
1. Physical and chemical properties of sediment substrate ·	21
1) Grain size	
2) Organic matter and Chlorophyll a/Phaeopigments contents	
3) Heavy metal contents	
2. Characteristics of benthic faunal communities	22
1) Species composition and density	
2) Bioaccumulation of heavy metals	
V. Discussion	23
VI. References	27

List of Figures

- Fig. 1. Study area and the sampling stations in Panwol intertidal mud flat on the west coast of Korea. 29
- Fig. 2. Changes in mud content with depth in the three sampling stations. 30
- Fig. 3. Changes in organic matter (ash-free dry weight) with depth in the three sampling stations. 31
- Fig. 4. Changes in organic carbon with depth in the three sampling stations. 32
- Fig. 5. Comparisons of chlorophyll a, phaeopigments and Chl a/phaeopigments ratios of the top 0.5 cm layer of sediment cores at three sampling stations. U: upper intertidal zone, M: middle i. z., L: lower i. z. Mean and standard error bars are presented. 33
- Fig. 6-1. Vertical profiles of Mn content in sediment cores at three stations. Total sediment was analysed after HNO₃/HClO₄/HF digestion. PPM: $\mu\text{g/g}$ dry wt. 35
- Fig. 6-2. Vertical profiles of Cu content in sediment cores at three stations. PPM: $\mu\text{g/g}$ dry wt. 36
- Fig. 6-3. Vertical profiles of Zn content in sediment cores at three stations. PPM: $\mu\text{g/g}$ dry wt. 37
- Fig. 6-4. Vertical profiles of Fe content in sediment cores at three stations. 38
- Fig. 6-5. Vertical profiles of Cr content in sediment cores at three stations. PPM: $\mu\text{g/g}$ dry wt. 39

Fig. 6-6. Vertical profiles of Ni content in sediment cores at three stations. PPM: $\mu\text{g/g}$ dry wt.	40
Fig. 6-7. Vertical profiles of Co content in sediment cores at three stations. PPM: $\mu\text{g/g}$ dry wt.	41
Fig. 6-8. Vertical profiles of Mo content in sediment cores at three stations. PPM: $\mu\text{g/g}$ dry wt.	42
Fig. 6-9. Vertical profiles of Cd content in sediment cores at three stations. PPM: $\mu\text{g/g}$ dry wt.	43
Fig.6-10. Vertical profiles of Pb content in sediment cores at three stations. PPM: $\mu\text{g/g}$ dry wt.	44
Fig. 7-1. Vertical profiles of Mn content in sediment cores at three stations. Only organic fraction of sediment was analysed after HNO_3 digestion following H_2O_2 pretreatment. PPM: $\mu\text{g/g}$ dry wt.	45
Fig. 7-2. Vertical profiles of Cu content in organic fraction of sediment cores at three stations. PPM: $\mu\text{g/g}$ dry wt.	46
Fig. 7-3. Vertical profiles of Zn content in organic fraction of sediment cores at three stations. PPM: $\mu\text{g/g}$ dry wt.	47
Fig. 7-4. Vertical profiles of Fe content in organic fraction of sediment cores at three stations.	48
Fig. 7-5. Vertical profiles of Cr content in organic fraction of sediment cores at three stations. PPM: $\mu\text{g/g}$ dry wt.	49
Fig. 7-6. Vertical profiles of Ni content in organic fraction of sediment cores at three stations. PPM: $\mu\text{g/g}$ dry wt.	50
Fig. 7-7. Vertical profiles of Co content in organic fraction of sediment cores at three stations. PPM: $\mu\text{g/g}$ dry wt.	51

- Fig. 7-8. Vertical profiles of Cd content in organic fraction of sediment cores at three stations. PPM: $\mu\text{g/g}$ dry wt. 52
- Fig. 7-9. Vertical profiles of Pb content in organic fraction of sediment cores at three stations. PPM: $\mu\text{g/g}$ dry wt. 53
- Fig. 8-1. Comparison of Mn content in sediment with that in the inhabiting dominant macrobenthos. Values are from the upper intertidal zone at St. A and the middle intertidal zone at St. B where animals were sampled. PPM: $\mu\text{g/g}$ dry wt. 54
- Fig. 8-2. Comparison of Cu content in sediment with that in the inhabiting dominant macrobenthos. Values are from the upper intertidal zone at St. A and the middle intertidal zone at St. B where animals were sampled. PPM: $\mu\text{g/g}$ dry wt. 55
- Fig. 8-3. Comparison of Zn content in sediment with that in the inhabiting dominant macrobenthos. Values are from the upper intertidal zone at St. A and the middle intertidal zone at St. B where animals were sampled. PPM: $\mu\text{g/g}$ dry wt. 56
- Fig. 8-4. Comparison of Fe content in sediment with that in the inhabiting dominant macrobenthos. Values are from the upper intertidal zone at St. A and the middle intertidal zone at St. B where animals were sampled. 57
- Fig. 8-5. Comparison of Cr content in sediment with that in the inhabiting dominant macrobenthos. Values are from the upper intertidal zone at St. A and the middle intertidal zone at St. B where animals were sampled. PPM: $\mu\text{g/g}$ dry wt. 58
- Fig. 8-6. Comparison of Ni content in sediment with that in the inhabiting dominant macrobenthos. Values are from the upper intertidal zone at St. A and the middle intertidal zone at St. B where animals were sampled. PPM: $\mu\text{g/g}$ dry wt. 59

- Fig. 8-7. Comparison of Co content in sediment with that in the inhabiting dominant macrobenthos. Values are from the upper intertidal zone at St. A and the middle intertidal zone at St. B where animals were sampled. PPM: $\mu\text{g/g}$ dry wt. 60
- Fig. 8-8. Comparison of Cd content in sediment with that in the inhabiting dominant macrobenthos. Values are from the upper intertidal zone at St. A and the middle intertidal zone at St. B where animals were sampled. PPM: $\mu\text{g/g}$ dry wt. 61
- Fig. 8-9. Comparison of Pb content in sediment with that in the inhabiting dominant macrobenthos. Values are from the upper intertidal zone at St. A and the middle intertidal zone at St. B where animals were sampled. PPM: $\mu\text{g/g}$ dry wt. 62
- Fig. 9. Relations between the organic carbon content and the mud content of sediment. r: product-moment correlation coefficient. 63

List of Tables

Table 1. Species composition and density of macro- and meio- benthic infaunal communities in Panwol intertidal mud flat in the summer of 1992. Numbers are individuals per m ²	34
---	----

I. 서론

연성저질에 서식하는 저서동물 (infauna)은 종에 따라 유기물이나 중금속 그리고 기타 다른 오염물질에 대하여 각기 다른 정도로 반응하고, 따라서 군집의 종조성, 밀도등이 급변하고 나아가서는 군집구조가 달라지는 양상을 보여준다. 이러한 오염원에 대한 민감성 외에도 대부분의 경우 저서동물의 서식장소가 한정되어 있다는 점에서, 저서동물은 수중생물 (pelagic organisms)에 비해 특정지역의 해양환경오염을 평가하는데 있어서 중요한 지표종 (indicator species) 으로서 그 가치를 널리 인정받고 있다 (reviewed by Bilyard, 1987).

국내에서는 해양생물중 상업적 가치가 있는 몇몇 종 (원, 1973; 이와이, 1984; 이, 1990)을 제외하고는, 연성저질에 서식하는 무척추동물에 대해서 한 중금속오염 및 기타 오염에 대한 연구가 거의 없다. 저서무척추동물의 오염은 인간에게 직접적인 피해를 주기 보다는 이들 저서동물들이 인간이 식용하는 어류나 계통의 먹이가 됨으로써 오는 간접적인 피해가 더 크다. 본 연구는 날로 심각해져가는 해양오염 특히 연안해역에서의 오염으로 인한 극심한 환경파괴를 완화시키고, 생물자원을 보전하며 효율적으로 이용하기위해 필수적으로 수행되어야 하는 기초연구이다.

본 연구의 목표는 다음과 같다.

- 1) 저서생물에 영향을 주는 오염의 종류를 파악한다: 오염의 종류는 첫째 다량으로 유입된 유기물질 (organic enrichment)로 인한 것으로 특정 종의 감소를 가져오는 반면, 어떤 종들은 오히려 밀도가 증가하기도 한다 (Pearson and Stanley, 1979; Gee et al., 1985; Grizzle and Penniman, 1991). 둘째 중금속과 같은 독성물질로 인한 것으로, 일반적으로 종의 수와 대부분의 종밀도가 크게 감소하는 경향을 보인다 (Warwick, 1986; Bilyard, 1987; Warwick et al., 1990; Regoli et al., 1991). 따라서 저서동물군집의 구조변화에 관한 연구가 오염에 의한 환경변화를 진단하는데 1차적으로 시행되어야 한다.
- 2) 저서동물군집의 구조적 변화를 가져온 결정적 원인을 밝혀낸다: 저서동물군집의 종조성 및 종밀도와 서식지 퇴적물의 물리화학적 특성, 중금속 함량과의 상관관계를 알아본다. 또한 특정 오염의 지표가 될 수 있는 지표종을 찾아내고자 한다.

- 3) 저서무척추동물의 오염으로 인간에게 파급될 수 있는 직접적 또는 간접적인 영향에 대하여 예측해 본다: 생태계내 주요 구성원들과 연구 대상생물간의 구조적 기능적 연관을 알아 보고 파급될 수 있는 영향을 진단해 본다.
- 4) 연안환경오염을 모니터링하는 데 있어서 효율적인 방안을 제시해 본다: 지표종에 대한 집중적이고 지속적인 연구, 그리고 연구결과의 합리적 적용 방안등을 생각해 본다.

II. 연구대상지역

조사지역은 서해안 경기만에 위치하는 작은 내만으로 펼쳐진 갯벌이 넓게 발달되어 있다 (Fig. 1). 완만한 경사타으로 간조때 대부분의 갯펄이 대기 중에 노출되고, 만조때는 모든지역이 해수에 잠긴다. 북쪽으로 주수로(main tidal channel)가 잘 발달되어 있으나 만 안쪽으로 들어올수록 점점 가늘어진다. 외부로부터의 담수 유입은 반월천과, 그 아래 배송면과 비봉면 사이를 흐르는 작은 규모의 하천, 그리고 고잔 저수지 정도이며, 반월공단 폐수처리장에서 배출되는 폐수가 있다. 본 연구지역은 10년전 북쪽에 대규모 공업단지인 반월공단이 들어서기 전에는 육상으로부터 다량의 오염물질의 유입이 거의 없었던 것으로 판단된다.

III. 재료 및 방법

1. 시료의 채집 및 처리

오염물질은 대부분 공단 폐수처리장을 통해 유입되는 것으로 판단되어, 폐수처리장으로부터 가까운 두 곳 (St. B와 St. C) 그리고 먼 곳 한 곳 (St. A)을 정하여, 1993년 7월초부터 8월초에 걸쳐 저서동물과 퇴적물을 채집하였다 (Fig. 1). St. A 조간대는 수많은 계구멍과 다모환충류의 구멍이 보인다. St. B와 St. C에는 상부에서만 어느정도의 계구멍만 보일뿐 중부와 하부조간대에는 생물의 흔적이 발견되지 않는다. 각 채집장소에서 6개의 can core (18cmx24cm)를 이용하여 깊이 30cm까지 퇴적물과 그 속에 서식하는 동물들을 채집하였다. 채집한 퇴적물은 상층 1cm는 5mm 마다 그리

로 1-2cm, 2-5cm간격으로, 깊이 5cm 이상은 매 5cm 마다 절단하여, 1개의 core로부터는 유기물, 엽록소 함량, 입도 분석용 시료를 채취하고 나머지 cores로부터는 대형저서동물을 수집하였다.

대형저서동물은 (macroinfauna) 1 mm sieve로 체질하여 수집하였다. 채집한 동물을 동정하여 각 채집장소별로 출현종, 종밀도를 산출하였다. 그러나 연구소앞 상부조건대에 많이 출현하는 대형다모환충류와 계의 생물량 자료는 다음과 같이 보완하였다: 4 m x 4 m 지역을 16개 (1 m x 1 m) 방형 구역으로 나눈 후 각 방형구역마다 다모환충류 및 계 구멍을 계수하고, 1개 방형구역은 깊이 50 m 까지 파내어 눈에 보이는 생물표품을 채집하였다.

중형저서동물 (meiofauna, > 63 μ m - < 1mm) 은 직경 2cm 주사기를 이용하여 표층 5mm 퇴적물로 부터 채취하여 5% 포르말린 용액으로 고정시킨 후 Rose Bangal로 염색하여, 63 μ m 체로 걸러 펄을 씻어낸 후 해부현미경 (x40) 아래서 동정하고 계수하였다. 일반적으로 대형저서동물은 특정지역의 오염을 평가하는데 매우 유용하나, 종다양성, 채집과 동정에 있어서 많은 시간과 노동을 필요로 하는 점, 그리고 얻어낸 자료를 해석하는데 있어서 어려움 등이 있다. 일반적으로 meiofauna는 동일 오염원이나 물리적 환경 변화에 대해 macrofauna와는 달리 반응하는 경우가 많다. 따라서 이 두 군집을 동시에 연구하는 것이, 전술한 문제점들을 완화시키면서 보다 정확한 오염 평가를 할 수 있는 것으로 알려져 있다 (Warwick et al., 1990). 또한 중금속 분석용 다모환충류와 계는 별도로 무작위 채집하였다. 이들의 fecal pellets도 함께 수집하였다.

2. 퇴적물의 유기물, 엽록소함량 및 입도분석

퇴적물의 유기물 함량은 시료를 Milli-Q water로 3회 씻어 염분을 제거하고, 110°C의 oven에서 약 24시간 건조시킨 후에, 분말로 하여 500°C furnace에서 4시간 태운 후 측정된 ash-free dry weight로 정하였다. 유기탄소함량은 건조시료를 8% H₂SO₃ 용액으로 calcium carbonate를 제거한 후 CNS 분석기 (Carlo-Erba NA-1500)로 측정하였다 (Verado et al., 1990). 엽록소함량은 시료를 90% acetone 로 냉암소에서 약 24시간 추출시킨후 Fluorometer (Turner Design 10-005R)로 측정하였다. 입도분석은 퇴적물을 30% H₂O₂에 담가 유기물을 제거한 후 증류수로 씻어 4 phi보다 작은 조립질 퇴적물은 Ro-Tap Sieve Shaker로 체질 (wet sieving)하여, 4 phi보다 큰 미세 퇴적물은 Sedigraph 5000D로 분석하였다.

3. 중금속 분석

1) 퇴적물의 중금속 함유량 분석

반월 조간대 퇴적물에 포함된 중금속은 sequential partial extraction methods 중 total digestion method 와 organic fraction digestion method 를 이용하여 분석하였다.

① Total sediment digestion --- 퇴적물 시료를 110°C의 oven에서 약 24시간 건조시킨 후에, 분말로 하여 약 200mg(0.2g)씩 뚜껑이 있는 Teflon용기에 넣는다. 다음 이들 시료에 HNO₃, HClO₄ 그리고 HF를 각각 3ml, 1ml, 4ml씩 가하여 잘 흔들어준 후 뚜껑을 완전히 밀폐하고 약 200°C의 가열판 위에서 20시간 정도 반응시킨다. 대부분의 퇴적물시료가 용해된 후 뚜껑을 열고 여분의 산 용액들을 완전히 증발시켜 황색내지 녹색의 gel이 되도록 한다. gel 상태로 용해된 시료에 1 N HNO₃를 30ml씩을 넣어 원심분리기에서 분리시켜 (3500 rpm, 15 min) 상층액을 취한다. 이 상층액을 다시 약 10배로 희석시킨 후 원자흡수분광분석기 (Atomic Absorption Spectrophotometer; SpectrAA-20, Varian)와 Inductively Coupled Plasma Spectrometer (ICP)로 중금속 농도를 측정하였다. 측정된 농도는 다시 시료 단위무게당 함량 (ug/g dry wt)으로 환산하였다. Mn, Zn, Fe, Cu는 air-acetylene불꽃의 SpectrAA-20를 Cd, Ni, Co, Cr, Pb 분석에는 ICP를 각각 사용하였다.

② Organic fraction --- 퇴적물에 포함되어 있는 중금속 중 organic matter와 sulfides에 포함된 중금속의 양을 알기위하여 다음과 같이 분석을 실시하였다. 위의 total digestion에서 사용된 동일 건조시료를 약 0.5g씩 취하여 뚜껑이 있는 Teflon 용기에 담았다. 준비된 시료를 Kersten & Förstner(1987)의 방법에 위하여 우선 30%의 H₂O₂ (pH=2)에 약 2 시간동안 담군 후 약 85°C 가열판 위에서 뚜껑을 연 상태로 건조시켰다. 다음 잔류 H₂O₂ 용액이 완전히 증발되고 남은 시료를 1N HNO₃ 10ml로 희석하여 원심분리한 후 상층액을 취하여 ①에서 사용된 동일 분석기기로 중금속의 농도를 측정하였다.

2) 저서동물의 중금속 함유량 분석

건조된 생물시료들을 1-2 g씩 취하여 10% HNO₃로 잘 씻은 pyrex glass beaker에 넣어 약 550°C의 furnace에서 3시간 가량 태우고 난 뒤, 진한 질

산용액으로 (4cc/g) 반응시켰다. 다음 반액체상태 (sludge)의 시료를 가열판 위에서 천천히 가열 반응시켰다. 용액이 모두 증발되고 난뒤 다시 1N 질산 10ml로 희석하여 원심분리하였다. 상층액을 취하여 약 15배로 희석하여 중금속 함량을 측정하였다. 측정기기는 퇴적물의 경우와 동일하였다.

IV. 결 과

1. 퇴적물의 물리 화학적 특성

1) 입도

세 조사정점의 퇴적물 깊이에 따른 입도분석의 결과가 Fig. 2 에 나타나 있다. 연구소 앞 (St. A) 표층 (0-2 cm) 퇴적물의 점토 (mud) 함량이 99% 이상, 나머지 깊이에서도 97% 이상으로 전 조사지역에서 가장 높았다. 한편 연구소 앞 하조간대의 경우 표층 퇴적물의 점토 함량이 약 90%, 나머지 깊이에서 84-90%, 그리고 하수처리장에서 가장 가까운 수문 앞 (St. B) 중조간대의 경우 표층이 87%, 나머지 깊이에서 86-92% 로 가장 낮았다.

2) 유기물 및 엽록소/Phaeopigments 함량

유기물과 유기탄소 함량은 Figs. 3과 4에 각각 나타나 있다. 연구소 앞 (St. A) 상 표층 2 cm 퇴적물의 평균 유기물함량은 6.3% (dry wt), 유기탄소함량은 1.35% 로 가장 높으며, 나머지 정점 표층퇴적물도 2-5%의 d유기물 함량을 보인다. St. B 하조간대 펄의 경우 연구소 앞 하조간대 펄과 유기물 함량이 유사하다. 일반적으로 전 조사정점에서 퇴적물의 깊이가 증가함에 따라 유기물함량이 감소하는 경향을 보인다.

엽록소 a 는 유기물함량과 마찬가지로 St. A 상조간대 펄에서 $6.0 \mu\text{g}/\text{cm}^2$ (SD=0.37, n=3)로 가장 높고, St. B 하조간대에서 $4.6 \mu\text{g}/\text{cm}^2$ (SD=0.36, n=4)로 다음으로 높고 나머지 조사정점에서는 $3.4-3.8 \mu\text{g}/\text{cm}^2$ 로 서로 유사하다 (Fig. 5). Phaeopigments 함량은 엽록소 a와는 대조적으로 St. A 하조간대 와 St. B 하조간대에서 각각 $1.77 \mu\text{g}/\text{cm}^2$ (SD=0.072, n=3), $1.61 \mu\text{g}/\text{cm}^2$ (SD=0.302, n=4)로 가장 높고 나머지 정점들에서는 $0.67-1.05 \mu\text{g}/\text{cm}^2$ 로 서로 유사하다. 결과적으로, 엽록소/Phaeopigments 비

율은 St. A 상조간대 펄이 10.9로 가장 높고, 나머지 정점에서는 2.3-5.0으로 서로 유사하다 (Fig. 5).

3) 중금속함량

Mn 을 제외한 나머지 중금속 즉, Cu, Zn, Fe, Cr, Ni, Co, Mo, Cd, Pb등은 모두 St. A 에서 가장 높고, St. B 와 St. C에서는 서로 유사하다 (Fig. 6-1에서 6-10). Organic fraction도 유사한 경향을 보인다 (Fig. 7-1에서 7-9). Cu, Zn, Cr, Cd등은 표층에 가까울수록 높게 나타나고 있다. Mn, Cu, Cr, Zn, Pb 등은 30-70% 정도가 퇴적물의 organic fraction에 포함되어 있고, Ni, Fe, Cd, Co 등은 소량 (< 20%)만이 organic fraction에 포함되어 있다.

2. 저서동물군집의 특성

1) 종조성 및 빈도수

각 조사정점에서 출현하는 macro- 와 meio- infauna 의 종과 빈도수가 Table 1 에 기재되어 있다. St. A 상조간대 펄에는 대형 다모류 (길이: 10 cm 내외, 평균개체습중량: 1.2 g)인 *Perinereis aibuhitensis* (Polychaeta: Nereidae, 두토막눈썹참갯지렁이 또는 청충)가 우점하며, 그 외에는 소형 다모류 (직경: < 1 mm, 평균개체습중량: 약 33 mg)인 *Heteromastus filiformis* (Polychaeta: Capitellidae)가 극소수 출현하고 있다. St. B의 상·중조간대에서는 *H. filiformis*가 유일한 종으로 출현하며, 특히 중조간대에 과밀하게 분포하는 한편 하조간대에는 출현하지 않는다. St. C의 상조간대에서는 St. B 상조간대의 경우와 유사한 밀도로 *H. filiformis*가 출현한다. Sts. A와 B의 하조간대에는 육안적으로 볼 수 있는 대형저서동물이 전혀 출현하지 않고 있다. 한편, 대형저서동물이 전혀 출현하지 않는 Sts. A 와 B 하조간대에 nematodes와 polychaete juveniles이 다수 출현하고 있다. 특히 nematodes는 모든 정점에서 출현하며 특히 St. B 중 하조간대에서 높은 밀도를 보이고 있다.

2) 생물체내 중금속함량

Sts. A와 B에서 각각 우점종으로 출현하는 다모류 *Perinereis aibuhitensis*와 *Heteromastus filiformis* 그리고 정량적으로 채집되지 않는

았으나 St. A 에서 흔히 출현하는 십각류 *Ilyoplax pingi* (필털콩게), *Helice tridens sheni* (참방게)에 대하여 중금속 분석을 실시하였다. 이들에 대한 분석 결과를 이들이 채집된 지역의 퇴적물에 대한 분석결과와 함께 Figs. 8-1부터 8-9에서 보여 주고 있다.

*Perinereis aibuhitensis*의 경우 대부분의 중금속이 체내함량이 서식지 표층퇴적물이나 fecal pellets에서보다 낮고, Cu만 체내함량 (241 $\mu\text{g/g dw}$)이 fecal pellets (165 $\mu\text{g/g dw}$)에서보다 높다 (Fig. 8-2). 십각류의 경우도 *Perinereis aibuhitensis*와 체내함량이 유사하다. 또한 *Ilyoplax pingi*의 모든 중금속함량이 *Helice tridense sheni*에서보다 높다. 특히 *I. pingi*의 Mn함량 (973 $\mu\text{g/g dw}$)은 채집지역 퇴적물 (354-543 $\mu\text{g/g dw}$)에서보다 높다.

*Heteromastus filiformis*의 경우 대부분의 중금속이 체내함량이 서식지 표층퇴적물이나 fecal pellets에서보다 낮으나, Mn (Fig. 8-1) 과 Cu (Fig. 8-2) 의 경우 체내함량이 서식지 표층퇴적물이나 fecal pellets에서보다 높다. 특히 Cu의 경우 체내함량이 449 $\mu\text{g/g dry wt}$ 로 서식지 표층퇴적물 (58-84 $\mu\text{g/g dry wt in total digested sediment}$; 31-45 $\mu\text{g/g in the organic fraction of sediment}$) 에서보다 5배 이상에 달하고 있다.

V. 고 찰

본 연구지역의 저서동물군집은 1985년 공단이 들어서기 이전 (Koh and Shin, 1988)과 비교해 볼 때 종조성이나 종밀도에 있어서 현격한 변화를 보여주고 있다. 거의 모든 지역에서 대부분의 종들이 전멸하고 개체수 및 총생물량이 격감했으며, 오염원에서 먼 곳과 가까운 곳에 완전히 다른 종이 출현하고 있다.

St. A 에는 우점종의 구성에 있어서는 공단이 들어서기 전과 유사하나 (Koh and Shin, 1988) 출현량은 매우 낮다. 즉 *Perinereis aibuhitensis*와 십각류만 남아 있고, 다른 저서생물은 거의 전멸하였다. *P. aibuhitensis*의 서식밀도는 공단설립이전에 86 inds/ m^2 에 달하였으나, 본 연구에서는 14 inds/ m^2 로 크게 감소하였다. St. A 상조간대에는 또한 1991년 말까지만 하여도 *Sweda japonica* (해홍나물)가 번성하였으나 이제는 자취를 감추었다.

또한 이매패인 *Potamocorbula amurensis*가 약 18800 inds/m², 십각류인 *Ilyoplax dentimerosa*, *Ilyoplax pingi*가 각각 933 inds/m², 168 inds/m²로 높은 서식밀도를 보였으나 이매패는 완전히 사라지고, 빈 껍질만 발견되었다. 십각류의 감소는 서식지내의 *S. japonica* 군락의 소멸과 관련이 있을 수도 있는 것으로 사료된다.

St. B와 St. C에는 이전에 서식하던 저서군집이 완전히 사라지고, 대신 기회종 (opportunistic species)으로 알려진 *Heteromastus filiformis* (Shaffer, 1983)가 독점하고 있다. 흥미로운 것은 *Heteromastus filiformis*의 경우 adult (macrofauna)는 St. B 중조간대 펄에 높은 밀도로 출현하고 St. B 하조간대에 전혀 출현하지 않는 반면, juveniles은 중조간대에서는 전혀 출현하지 않고 하조간대에서만 다수 출현하고 있다. 또한 *H. filiformis* juvenile과 함께 역시 기회종으로 조하대에 서식하는 것으로 알려진 *Pseudopolydora* sp.가 같은 곳에 다수 출현하고 있다. Sts. B와 C의 상조간대에는 부분적으로 아직 *S. japonica*가 서식하고 있다.

일반적으로 연구소 앞 펄 (St. A)이 수문 앞 (St. B)과 초소 옆 (St. C)보다 유기물함량이 높는데, 이는 연구소 앞 펄이 sand함량이 적고 (<3%) 점토함량이 큰 것과 어느 정도 상관관계가 있다 (Fig. 9). 경사가 완만한 조간대에서 흔히 일어나는 세립질의 광물입자가 만안쪽으로 들어 올수록 퇴적이 많이 되는 현상이다. 그러나, St. A 하조간대 펄의 경우 St. B 중조간대 펄과 점토함량이 유사함에도 불구하고 유기물함량은 St. A 하조간대 펄이 훨씬 높은 것으로 보아서, 점토함량 이외에, 또 다른 유기물함량을 결정하는 인자가 있는 것으로 사료된다. 표층퇴적물의 염록소함량이 유기물함량과 유사한 경향을 보이는 것으로 보아서, benthic diatom에 의한 유기물의 생산 기타 bacteria와 같은 미생물의 증식이 퇴적물내 유기물함량을 증가시키고 있는 것으로 사료된다. 이와 같은 유기물 함량은 공단이 들어서기 이전 (3-5%; Koh and Shin, 1988)과 유사한 수준이며, 만 안쪽인 St. A 상조간대에서 가장 높게 나타나고 있는 것도 유사하다. 그러나 조사정점별 차이가 공단이 들어서기 이전 (<2%)보다 훨씬 높게 나타나고 있다. 특히 *Heteromastus filiformis*가 많이 출현하는 St. B 중조간대 퇴적물은 St. A 상조간대에서보다 4% 정도 낮은 유기물 함량을 보인다.

중금속함량 역시 연구소 앞 펄 (St. A)이 수문 앞 (St. B)과 초소 옆 (St. C)보다 높는데, 이는 앞에서 설명한 바와 같이 점토함량이 큰 것과 어느 정도 관계가 있는 것으로 보인다. Co, Fe, Ni 함량은 깊이에 따라 뚜렷한 변화를 보이지 않는 반면, Cu, Zn, Cr, Cd등은 표층에 가까울수록 점점 농

도가 높게 나타나고 있어, 최근 이 지역에 Cu, Zn, Cr, Cd등이 계속 유입되고 있음을 시사하고 있다. 특히 Cu, Zn는 서해안 조간대중 오염이 되지않은 다른 조간대 지역 (유, 1990)과 비교해 볼 때 10배 이상 높게 나타나고 있다. Cr, Zn, Mn, Cu, Pb는 유기물함량과 높은 상관성을 갖는 금속으로 본 연구자료에서도 잘 나타나고 있다. 특히 유기물함량이 높은 St. A에서 이러한 상관성이 더욱 두드러지게 나타나고 있다. 한편, Ni, Fe, Co는 유기물과 관련이 적은 금속으로 본 연구결과에서도 잘 나타나고 있다. Cd은 유기물함량과 함께 입도에 의해서도 농도분포가 결정되는데, 본 연구에서는 유기물과의 관련은 다소 적게 나타나고 있다.

다모환충류인 *Perinereis aibuhitensis*는 Zn, Cu, Cd을 체내에 축적하고, *Heteromastus filiformis*는 Mn, Cu를, 십각류인 *Ilyoplax pingi*는 Mn을 축적하는 것으로 나타났다. 이들 금속은 모두 유기물과 친화력이 높은 금속으로 저서동물들이 퇴적물을 섭취하여, 그 안의 유기물질만을 선택적으로 소화·흡수하고, 생리적으로 조절이 가능한 것은 배설이 되나, 조절이 불가능한 것은 체내에 계속 축적됨으로서 일어나는 현상이라고 하겠다. *P. aibuhitensis*는 우리나라 연안에 널리 분포하는 종으로 저서어류의 주요 먹이생물로 이용되고 있고 (김, 1987), 또한 낚시용 미끼로서 1970년도 초반부터 해외로 수출되고 (이, 1992) 있기 때문에 먹이사슬을 통한 중금속의 생물농축 (Bioaccumulation)은 심각한 정도에 이를 수도 있는 것으로 사료된다. *H. filiformis*의 경우 대부분의 중금속이 체내함량이 서식지 표층퇴적물이나 fecal pellets에서보다 낮으나, Cu와 Mn의 경우 체내함량이 서식지 표층퇴적물이나 fecal pellets에서보다 높다. 특히 Cu의 경우 체내함량 대 서식지 퇴적물내 함량비율이 5.4 이상이고, 체내함량 대 배설물내함량비율이 약 2.4 로 체내축적이 일어나고 있음을 시사해 주고 있다. 또한 중금속오염에 지표종으로 널리 연구되고 있는 진주담치 (*Mytilus edulis*) 한국 연안산 (3.7-7.6 $\mu\text{g/g}$; 이, 1990)보다 59-122배로 높게 나타나고 있다.

본 연구결과로 나타난 빈약한 저서동물상, 일부우점종의 소멸과 기회종의 출현등을 볼 때 본 조사지역의 저서동물군집이 환경악화로 크게 저해 받고 있음을 알 수 있다. 유기물질의 다량유입 (organic enrichment)에 의한 오염은 본 연구지역에서 발견되지 않았으며, 중금속 또한 공단에서 멀리 떨어진 St. A 상조간대에서 중금속함량과 생물량이 모두 가장 높은 것으로 볼 때, 중금속오염이 불과 수 년만에 종의 수와 군집밀도가 크게 감소한 결정적 요인은 아닌 것 같다. 짧은 기간동안 생물량이 격감한 것은 organochlorines과 같은 유기독성물질 그리고 기타 독성물질의 지속적 또는 일시적인 그러나 다량유출등을 의심해 볼 수 있으나, 정확한 군집저해요인에 대해서는 좀 더 구체적인 연구가 요구된다.

VI. 참고 문헌

- Bilyard, G. 1987. The value of benthic infauna in marine pollution monitoring studies. *Marine Pollution Bull.*, 18(11): 581-585
- Gee, J. M., R. M. Warwick, M. Schaanning, J. A. Berge and W. G. Ambrose, Jr. 1985. Effects of organic enrichment on meiofaunal abundance and community structure in sublittoral soft sediments. *J. Exp. Mar. Biol. Ecol.*, 91: 247-262
- Grizzle, R. E. and C. A. Penniman. 1991. Effects of organic enrichment on estuarine macrofaunal benthos: a comparison of sediment profile imaging and traditional methods. *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, 74: 249-262
- Kersten, M. and U. Förstner. 1987. Effect of sample pretreatment on the reliability of solid speciation data of heavy metals-implications for the study of early diagenetic processes. *Mar. Chem.*, 22(1987): 299-312
- Koh, C. H. and H. C. Shin. 1988. Environmental characteristics and distribution of macrobenthos in a mudflat of the west coast of Korea (Yellow Sea). *Nether. J. Sea Resear.*, 22(3): 279-290
- Pearson T. H. and S. O. Stanley. 1979. Comparative measurement of the redox potential of marine sediments as a rapid means of assessing the effect of organic pollution. *Mar. Biol.*, 53: 371-379
- Shaffer, P. L. 1983. Population ecology of *Heteromastus filiformis* (Polychaeta: Capitellidae). *Nether. J. Sea Resear.*, 17(1): 106-125
- Regoli, F., E. Orlando, M. Mauri, M. Nigro and G. A. Cognetti. 1991. Heavy metal accumulation and calcium content in the bivalve *Donacilla cornea*. *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, 74: 219-224
- Verado, D. J., P. N. Froelich and A. McIntyre. 1990. Determination of organic carbon and nitrogen in marine sediments using the Carlo Erba NA-1500 Analyzer. *Deep-Sea Resear.*, 37 (1): 157-165
- Warwick, R. M. 1986. A new method for detecting pollution effects on marine macrobenthic communities. *Mar. Biol.*, 92: 557-562

- Warwick, R. M., H. M. Platt, K. R. Clarke, J. Agard and J. Gobin.
1990. Analysis of macrobenthic and meiobenthic community structure in relation to pollution and disturbance in Hamilton Harbour, Bermuda. *J. Exp. Mar. Biol. Ecol.*, 138: 119-142
- 김 종관. 1987. 삼천포 수도의 연안어류 섭식상태. 박사학위 논문, 부산수산대학. 142 pages
- 원 종훈. 1973. 한국산 어패류중의 수은 카드뮴 납 구리의 함량. *한국수산학회지*, 6(1,2):1-19
- 유 홍룡. 1990. 한국 남 서해안 조간대의 종합조사연구(II). 한국해양연구소, 과학기술처. 255 pages
- 이 수형 과 이 광우. 1984. 한국연안 진주담치의 중금속 함유량. *한국해양학회지*, 19(2): 111-117
- 이 수형. 1990. 연안환경 안전기술 개발연구(제 3차 년도). 한국해양연구소, 과학기술처. 260 pages
- 이 재학. 1992. 서해 조간대에 분포하는 두토막눈썸참갯지렁이 (*Perinereis aibuhitensis*)의 개체군 동태에 관한 연구. 한국해양연구소 (BSPE 00255-446-3). 78 pages

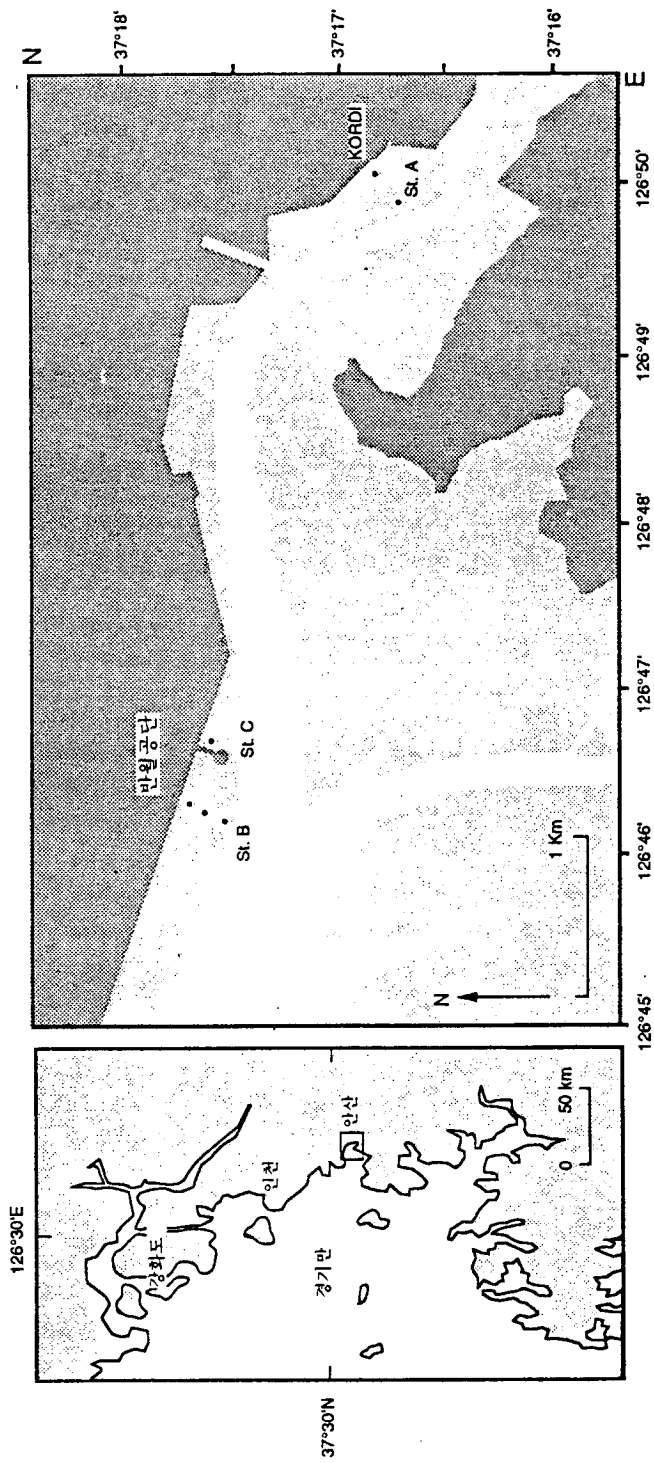


Fig. 1. Study area and the sampling stations in Panwol intertidal mud flat on the west coast of Korea

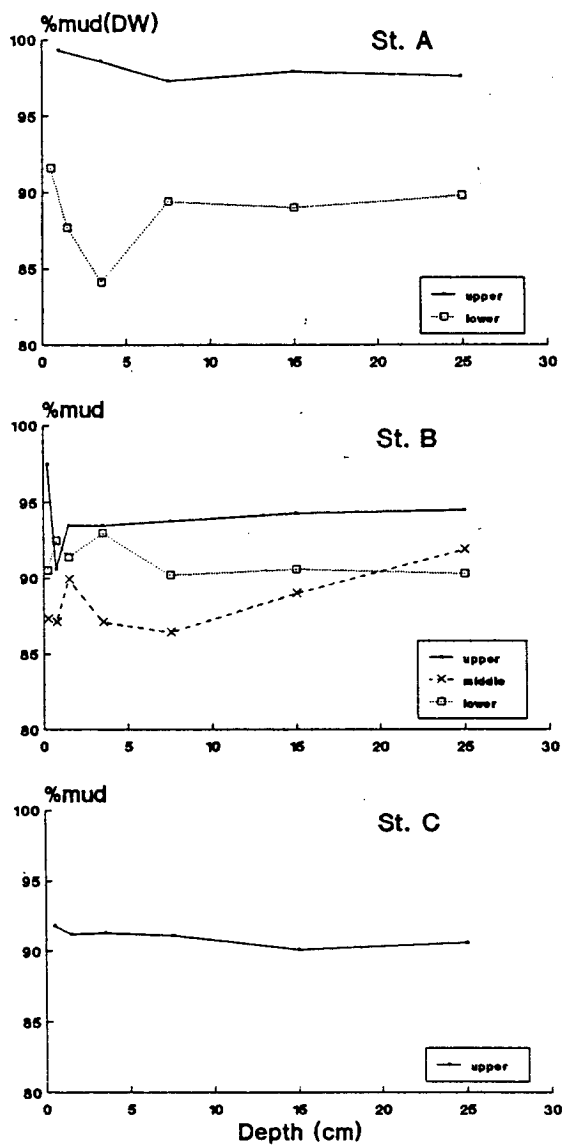


Fig. 2. Changes in mud content with depth in the three sampling stations.

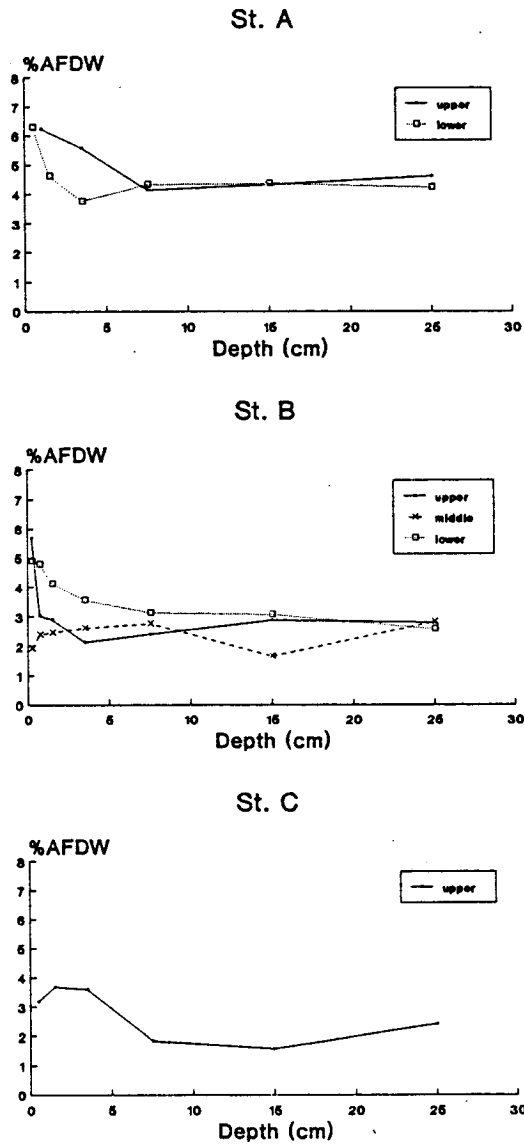


Fig. 3. Changes in organic matter (ash-free dry weight) with depth in the three sampling stations

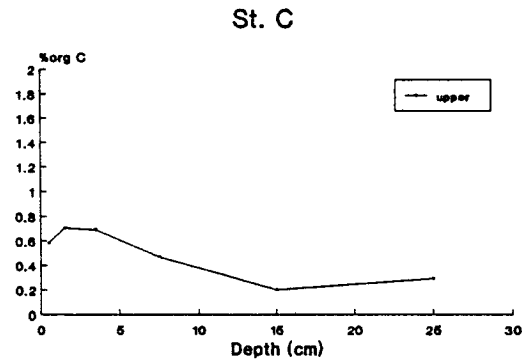
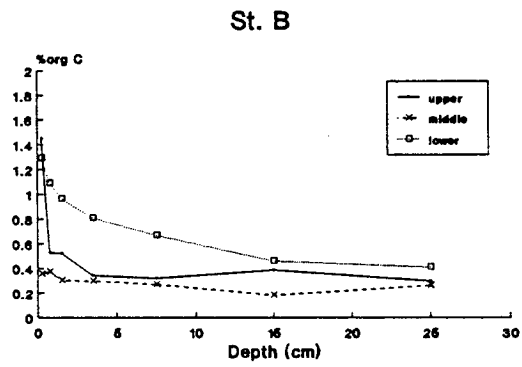
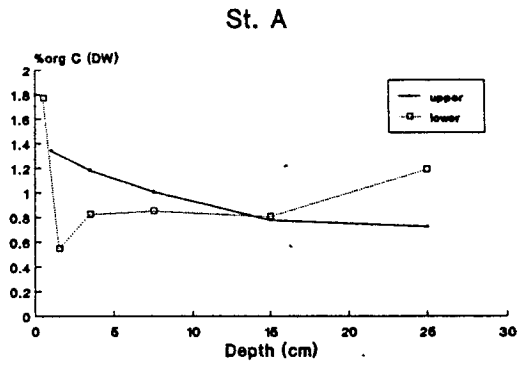


Fig. 4. Changes in organic carbon with depth in the three sampling stations

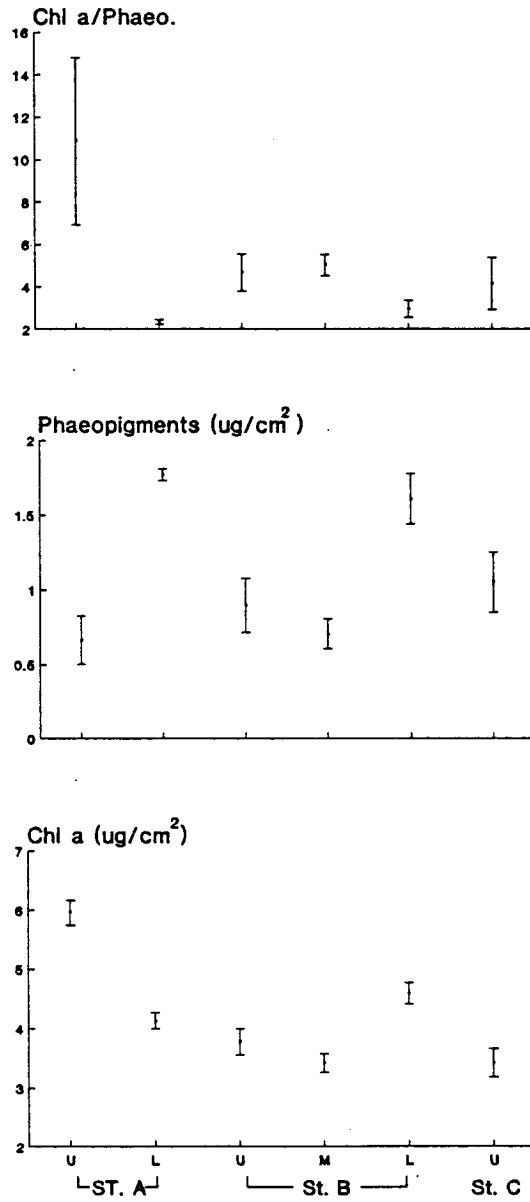


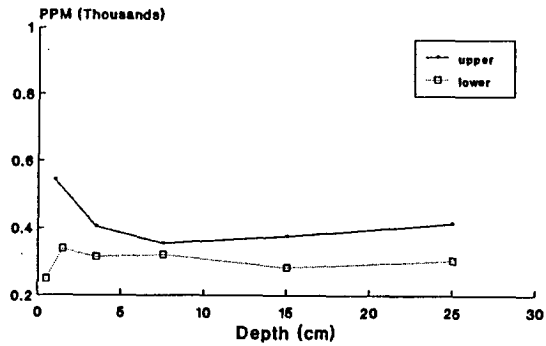
Fig. 5. Comparisons of chlorophyll a, phaeopigments and Chl a/phaeopigments ratios of the top 0.5 cm layer of sediment cores at three sampling stations. U: upper intertidal zone, M: middle i. z., L: lower i. z. Mean and standard error bars are presented.

Table 1. Species composition and density of macro- and meio- benthic infaunal communities in Panwol intertidal mud flat in the summer of 1992. Numbers are individuals per m².

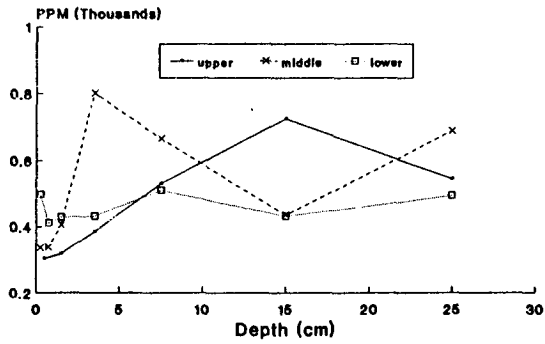
Species	St. A		St. B			St. C
	upper	lower	upper	middle	lower	upper
Macrofauna						
<i>Perinereis aibuhitensis</i>	14					
<i>Heteromastus filiformis</i>	2		62	395		46
Meiofauna						
Nematodes(x10 ³)	16	56	19	3520	2621	123
<i>H. filiformis</i> (juveniles)		23000			110000	
<i>Pseudopolydora</i> sp.		27000			12000	

Mn

St. A



St. B



St. C

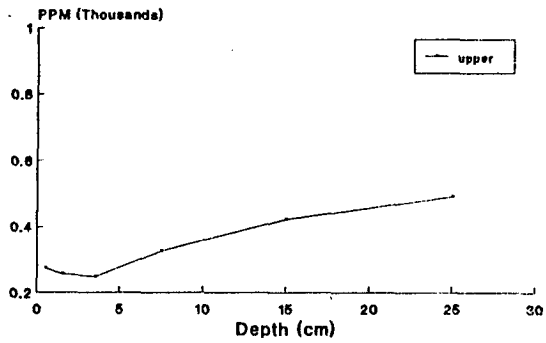
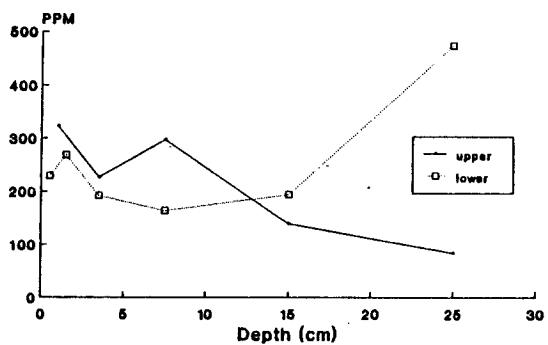


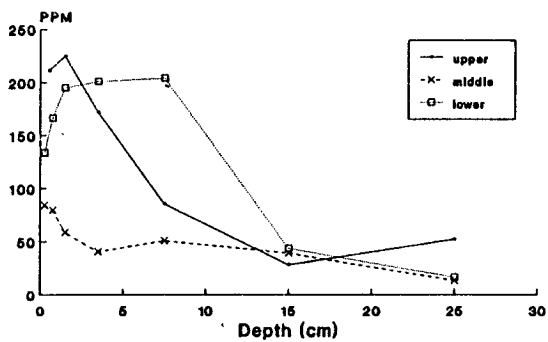
Fig. 6-1. Vertical profiles of Mn content in sediment cores at three stations. Total sediment was analysed after $\text{HNO}_3/\text{HClO}_4/\text{HF}$ digestion. PPM: $\mu\text{g}/\text{g}$ dry wt.

Cu

St. A



St. B



St. C

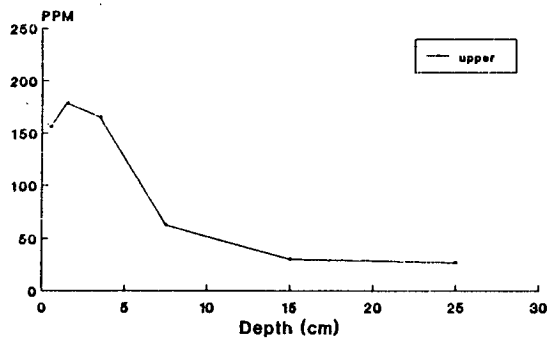
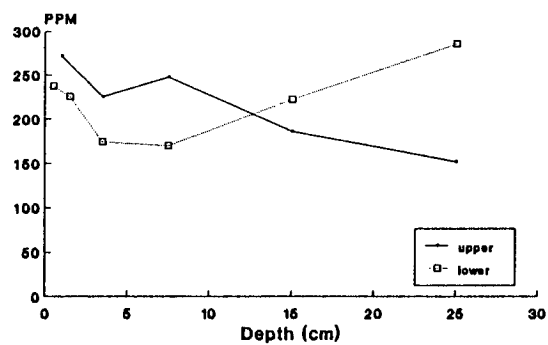


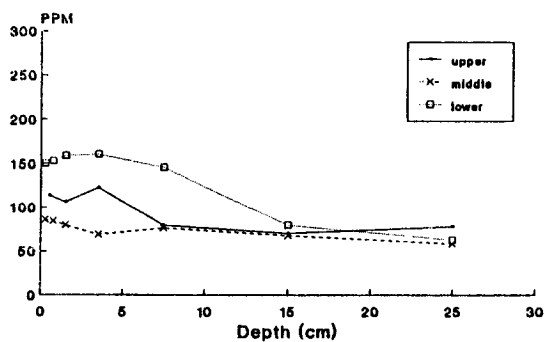
Fig. 6-2. Vertical profiles of Cu content in sediment cores at three stations. PPM: $\mu\text{g/g}$ dry wt.

Zn

St. A



St. B



St. C

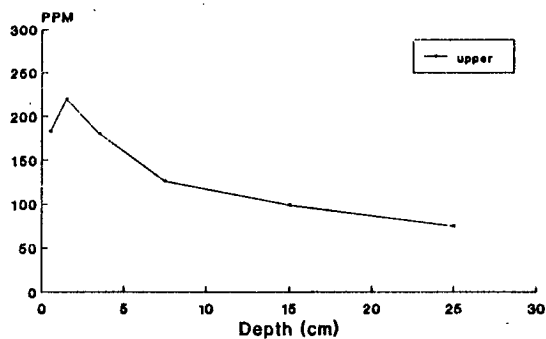
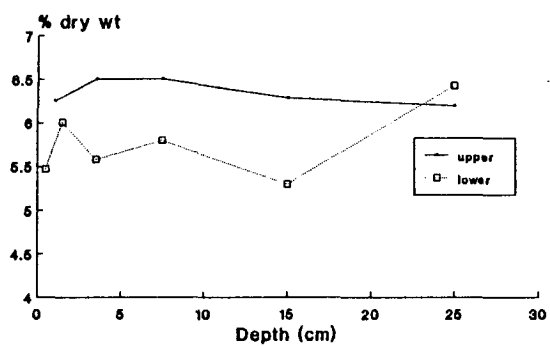


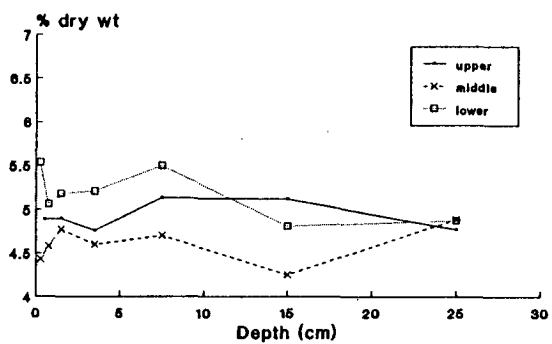
Fig. 6-3. Vertical profiles of Zn content in sediment cores at three stations. PPM: $\mu\text{g/g}$ dry wt.

Fe

St. A



St. B



St. C

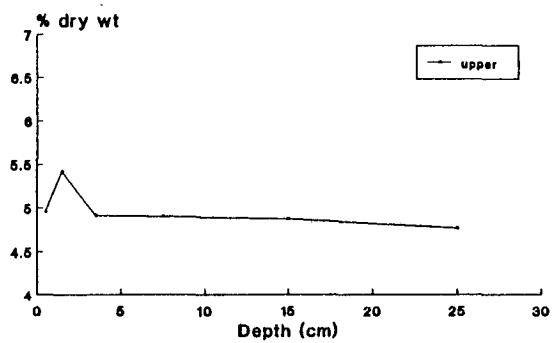
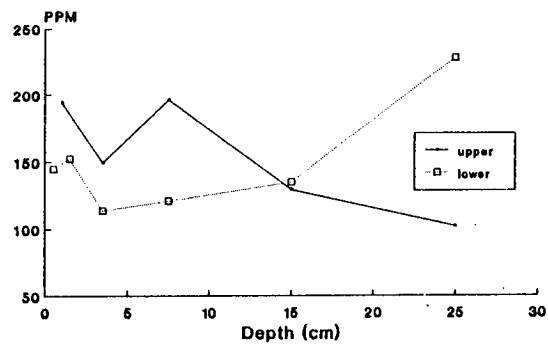


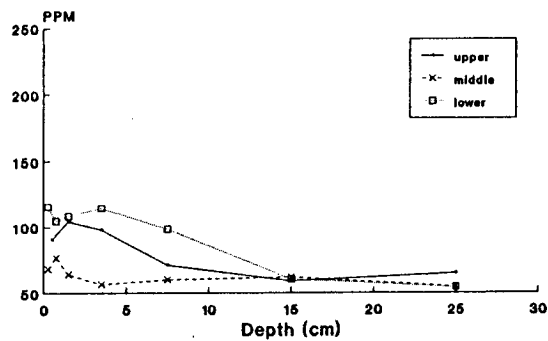
Fig. 6-4. Vertical profiles of Fe content in sediment cores at three stations.

Cr

St. A



St. B



St. C

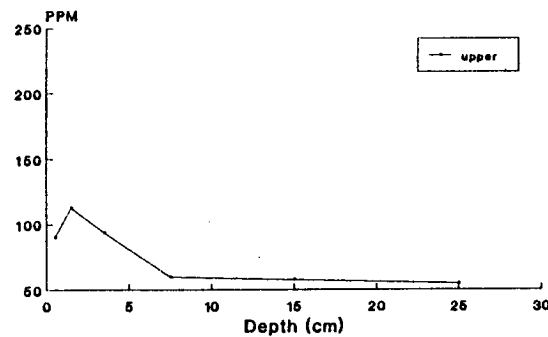
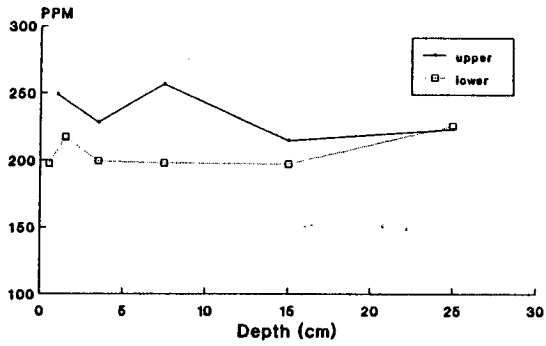


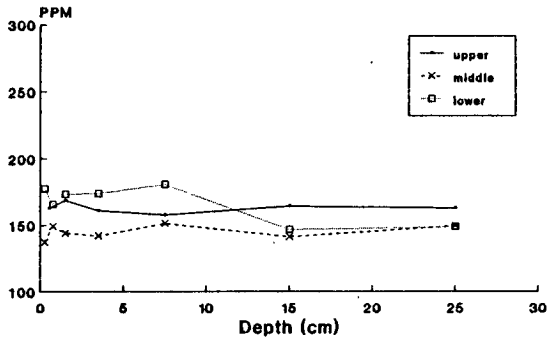
Fig. 6-5. Vertical profiles of Cr content in sediment cores at three stations. PPM: $\mu\text{g/g}$ dry wt.

Ni

St. A



St. B



St. C

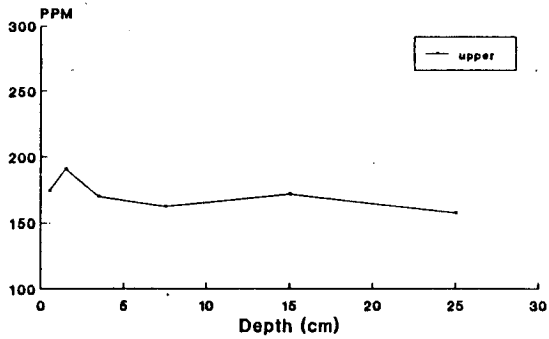
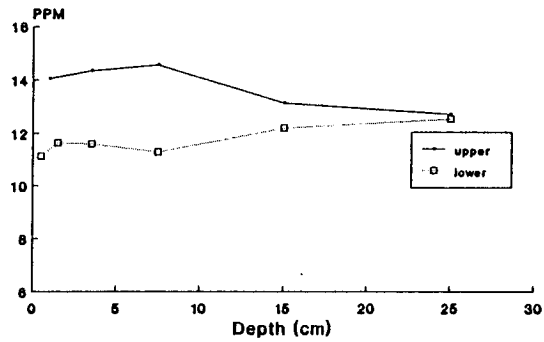


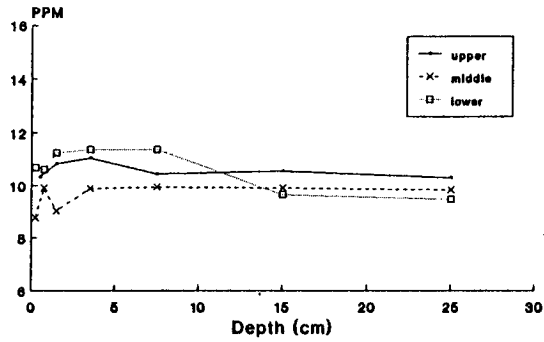
Fig. 6-6. Vertical profiles of Ni content in sediment cores at three stations. PPM: $\mu\text{g/g}$ dry wt.

Co

St. A



St. B



St. C

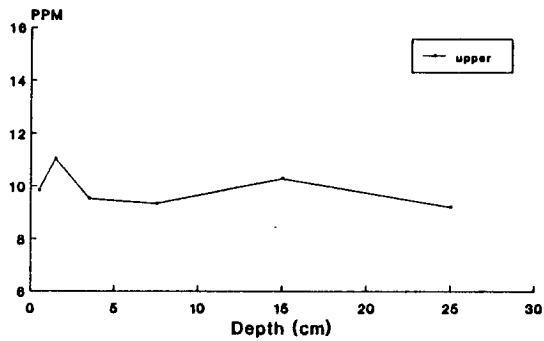
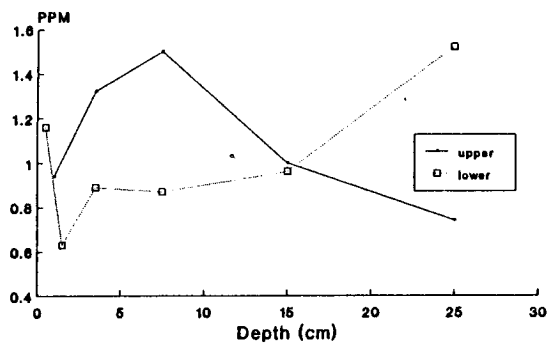


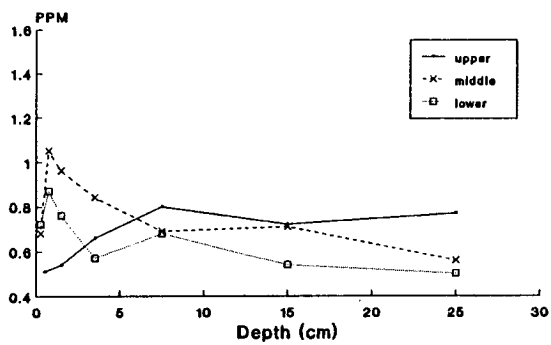
Fig. 6-7. Vertical profiles of Co content in sediment cores at three stations. PPM: $\mu\text{g/g}$ dry wt.

Mo

St. A



St. B



St. C

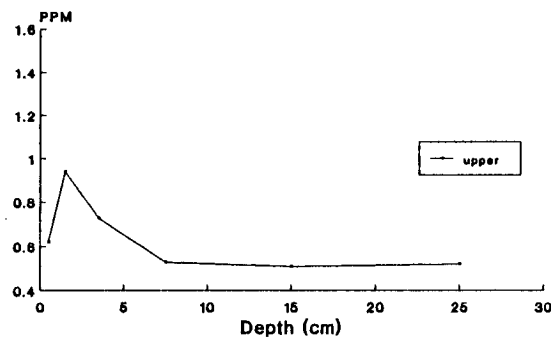
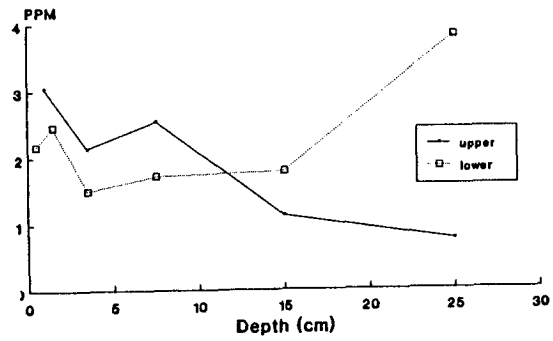


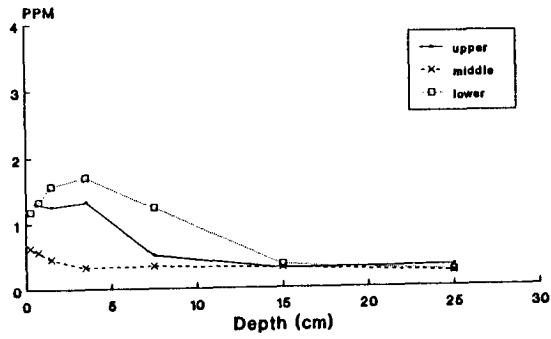
Fig. 6-8. Vertical profiles of Mo content in sediment cores at three stations. PPM: $\mu\text{g/g}$ dry wt.

Cd

St. A



St. B



St. C

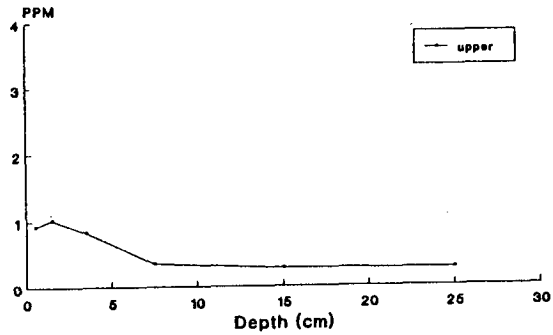
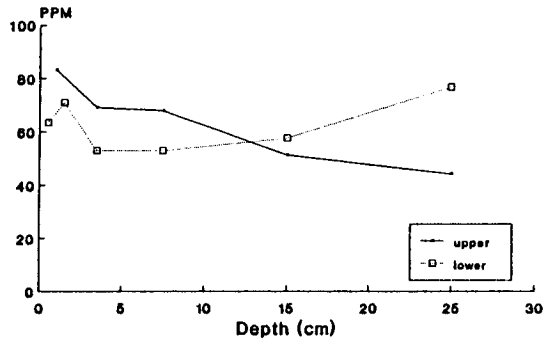


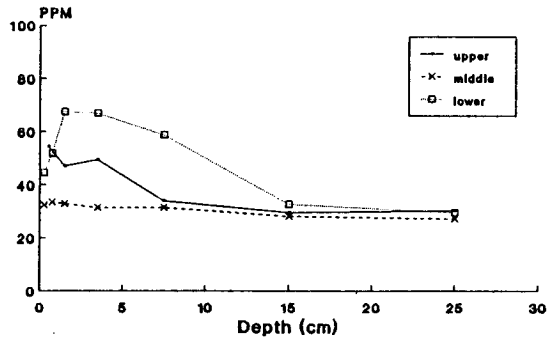
Fig. 6-9. Vertical profiles of Cd content in sediment cores at three stations. PPM: $\mu\text{g/g}$ dry wt.

Pb

St. A



St. B



St. C

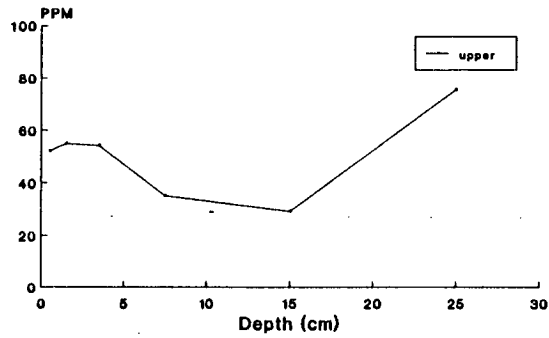
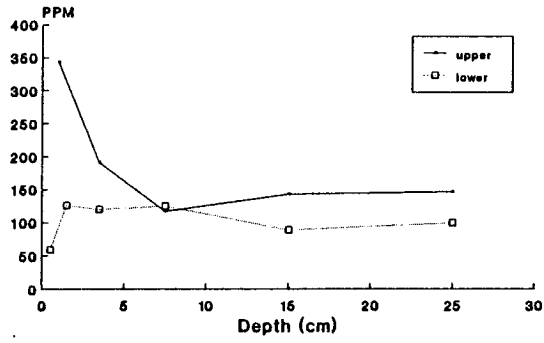


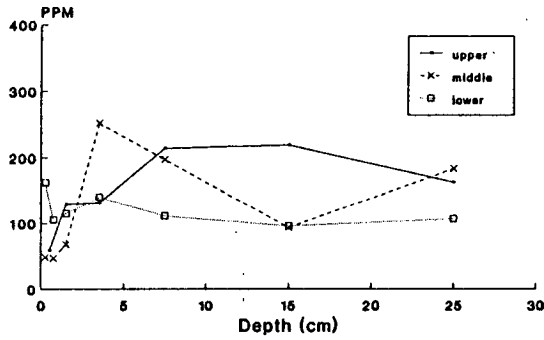
Fig. 6-10. Vertical profiles of Pb content in sediment cores at three stations. PPM: $\mu\text{g/g}$ dry wt.

Mn

St. A



St. B



St. C

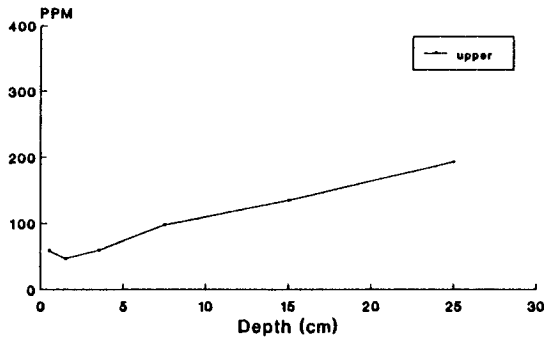
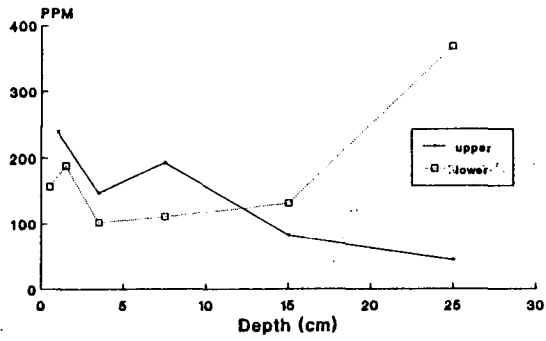


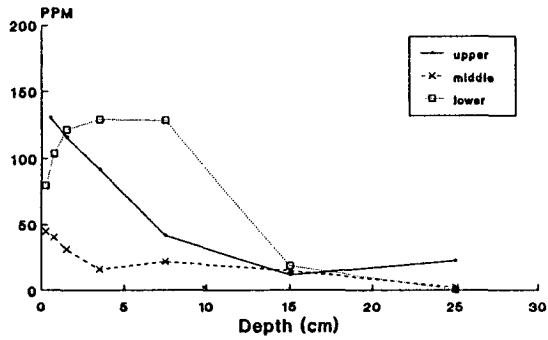
Fig. 7-1. Vertical profiles of Mn content in sediment cores at three stations. Only organic fraction of sediment was analysed after HNO_3 digestion following H_2O_2 pretreatment. PPM: $\mu\text{g/g}$ dry wt.

Cu

St. A



St. B



St. C

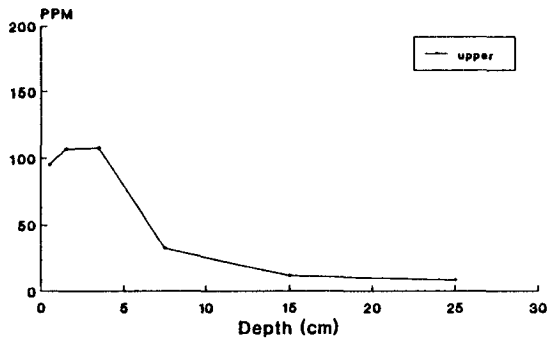
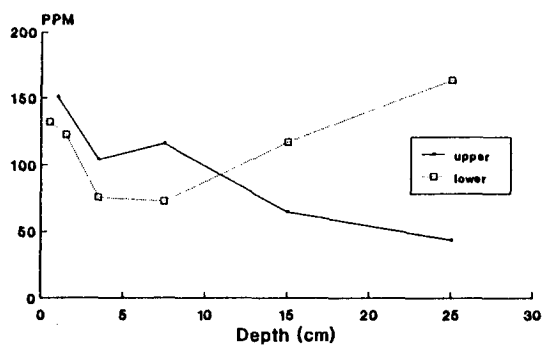


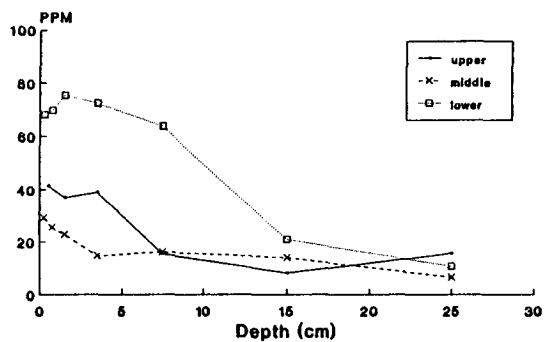
Fig. 7-2. Vertical profiles of Cu content in organic fraction of sediment cores at three stations. PPM: $\mu\text{g/g}$ dry wt.

Zn

St. A



St. B



St. C

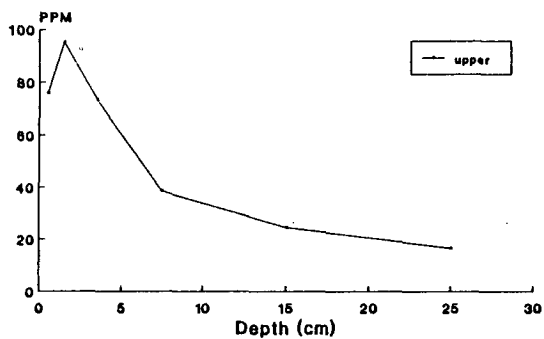
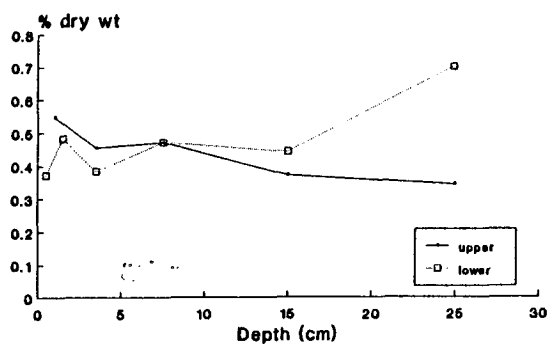


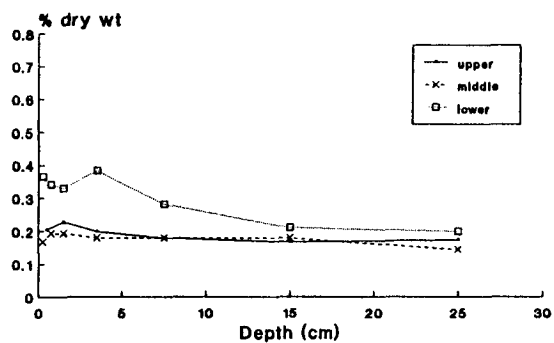
Fig. 7-3. Vertical profiles of Zn content in organic fraction of sediment cores at three stations. PPM: $\mu\text{g/g}$ dry wt.

Fe

St. A



St. B



St. C

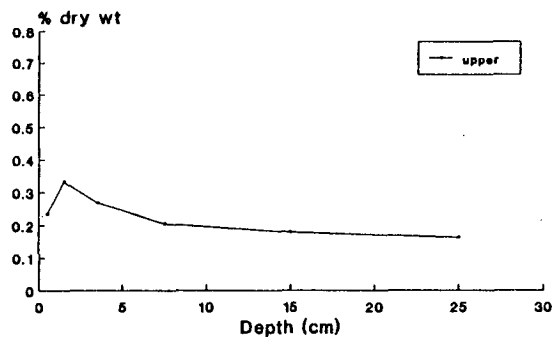
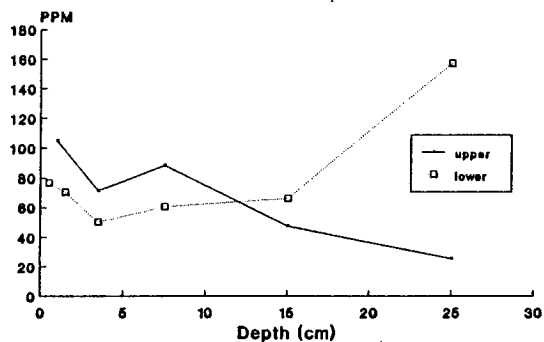


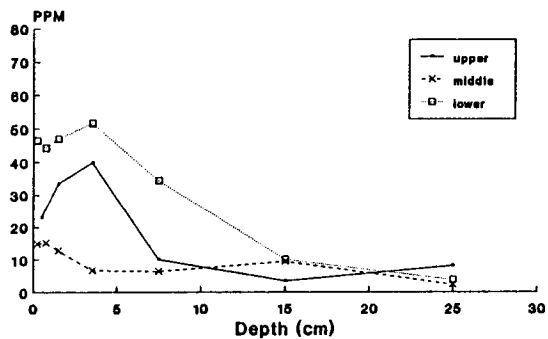
Fig. 7-4. Vertical profiles of Fe content in organic fraction of sediment cores at three stations.

Cr

St. A



St. B



St. C

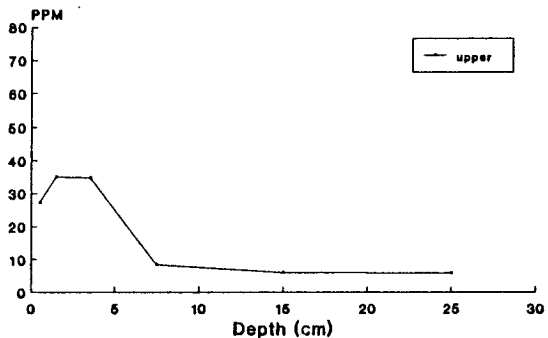
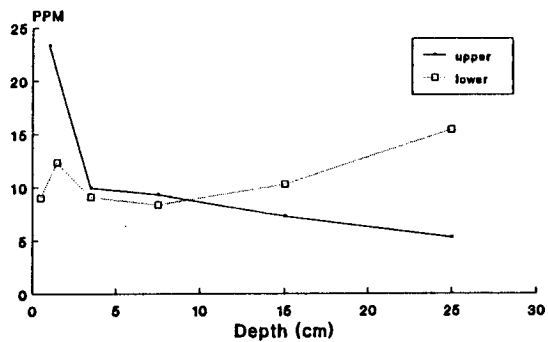


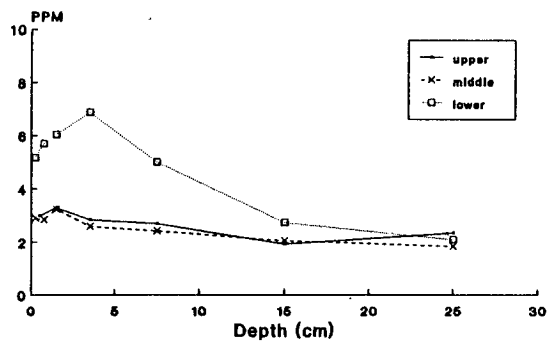
Fig. 7-5. Vertical profiles of Cr content in organic fraction of sediment cores at three stations. PPM: $\mu\text{g/g}$ dry wt.

Ni

St. A



St. B



St. C

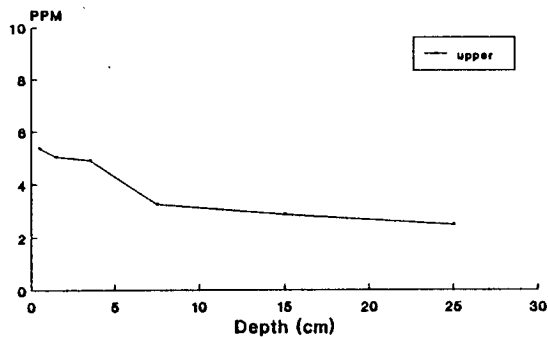
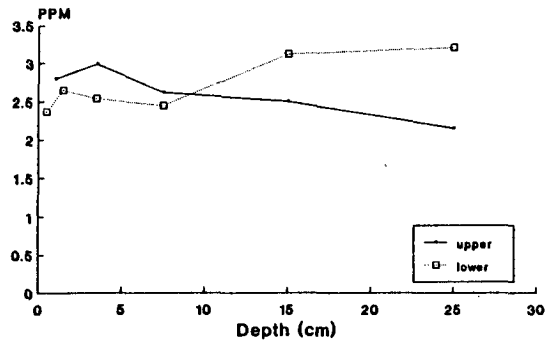


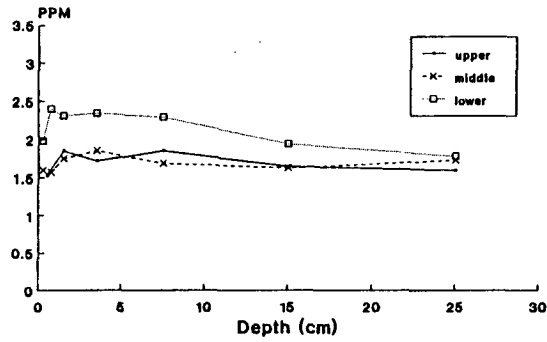
Fig. 7-6. Vertical profiles of Ni content in organic fraction of sediment cores at three stations. PPM: $\mu\text{g/g}$ dry wt.

Co

St. A



St. B



St. C

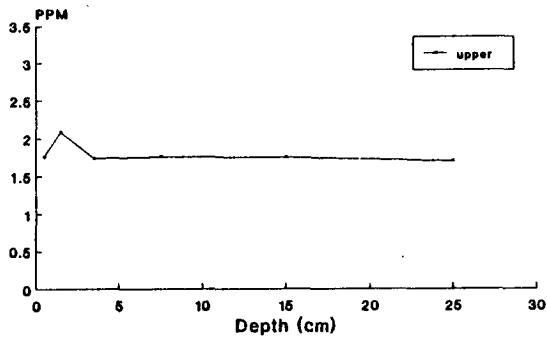
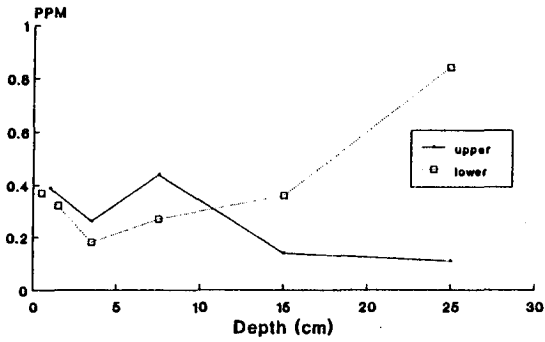


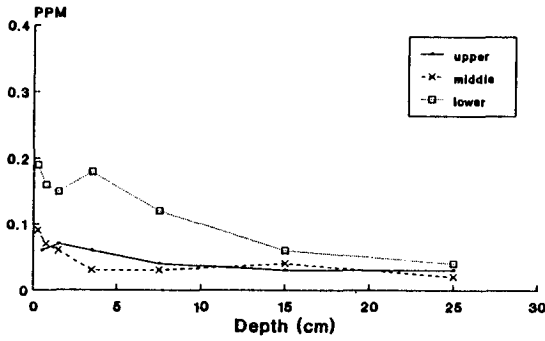
Fig. 7-7. Vertical profiles of Co content in organic fraction of sediment cores at three stations. PPM: $\mu\text{g/g}$ dry wt.

Cd

St. A



St. B



St. C

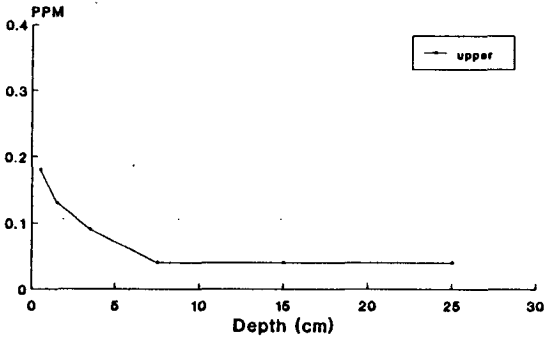
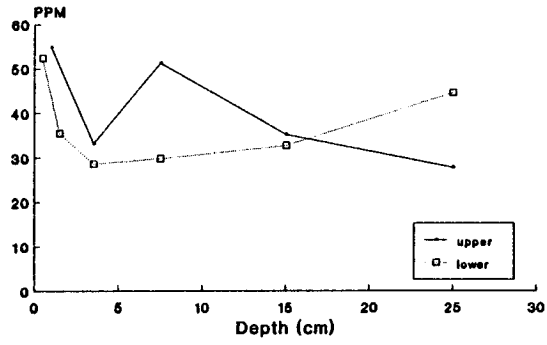


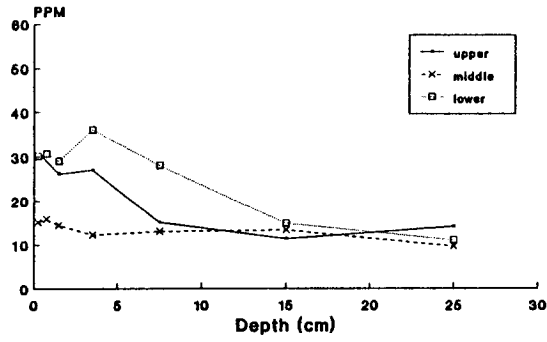
Fig. 7-8. Vertical profiles of Cd content in organic fraction of sediment cores at three stations. PPM: $\mu\text{g/g}$ dry wt.

Pb

St. A



St. B



St. C

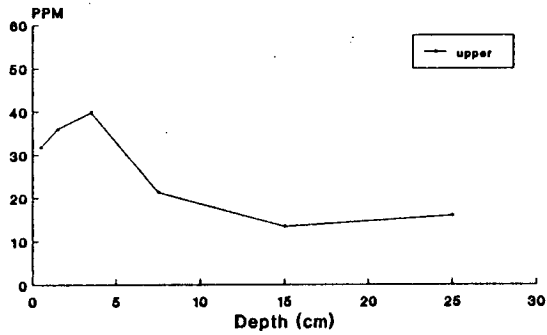
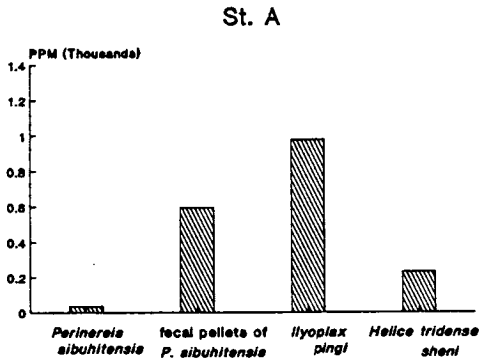
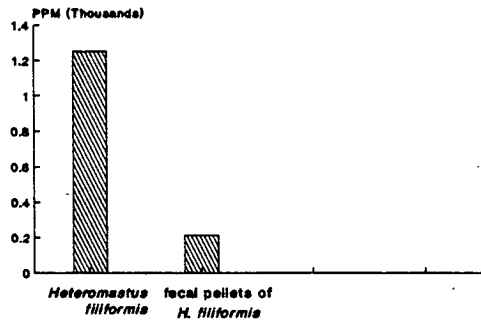


Fig. 7-9. Vertical profiles of Pb content in organic fraction of sediment cores at three stations. PPM: $\mu\text{g/g}$ dry wt.

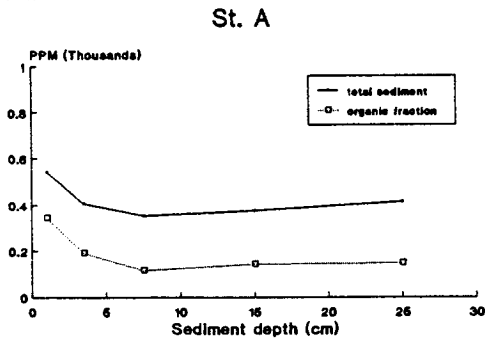
Mn



St. B



Mn



St. B

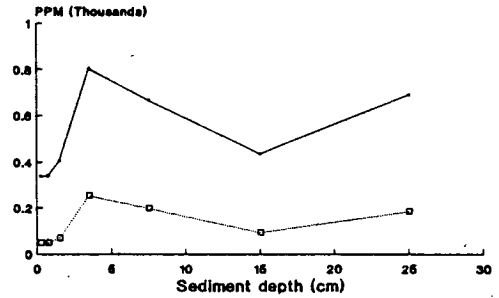


Fig. 8-1. Comparison of Mn content in sediment with that in the inhabiting dominant macrobenthos. Values are from the upper intertidal zone at St. A and the middle intertidal zone at St. B where animals were sampled. PPM: $\mu\text{g/g}$ dry wt.

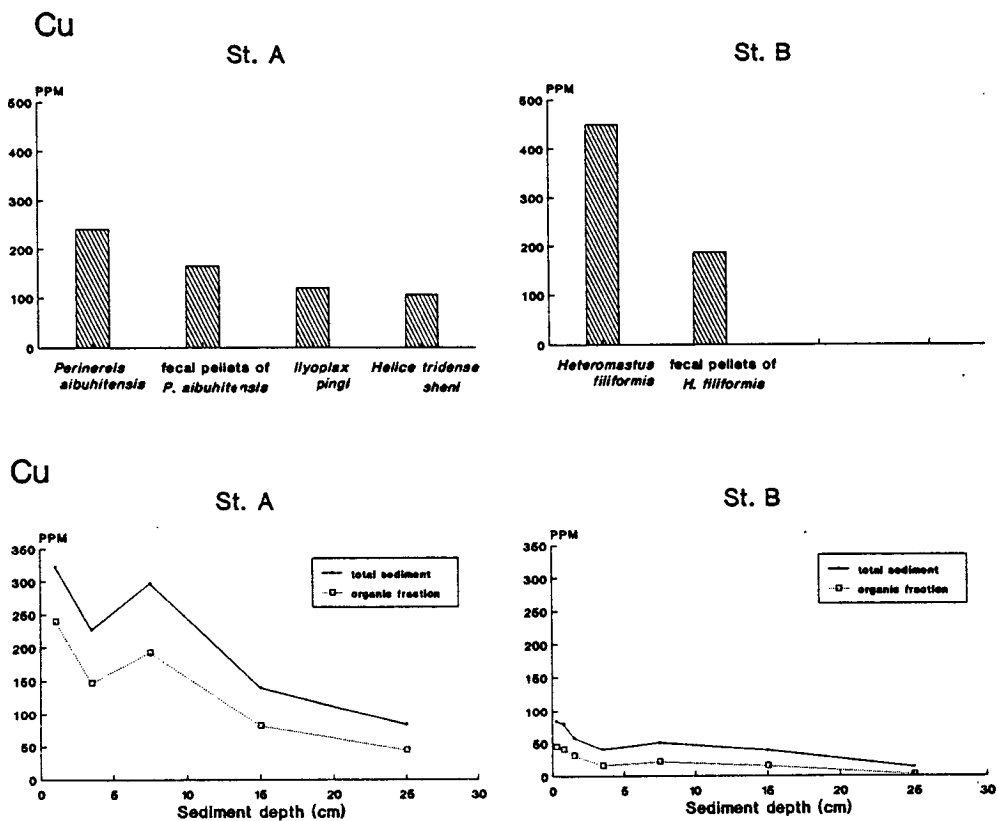


Fig. 8-2. Comparison of Cu content in sediment with that in the inhabiting dominant macrobenthos. Values are from the upper intertidal zone at St. A and the middle intertidal zone at St. B where animals were sampled. PPM: $\mu\text{g/g}$ dry wt.

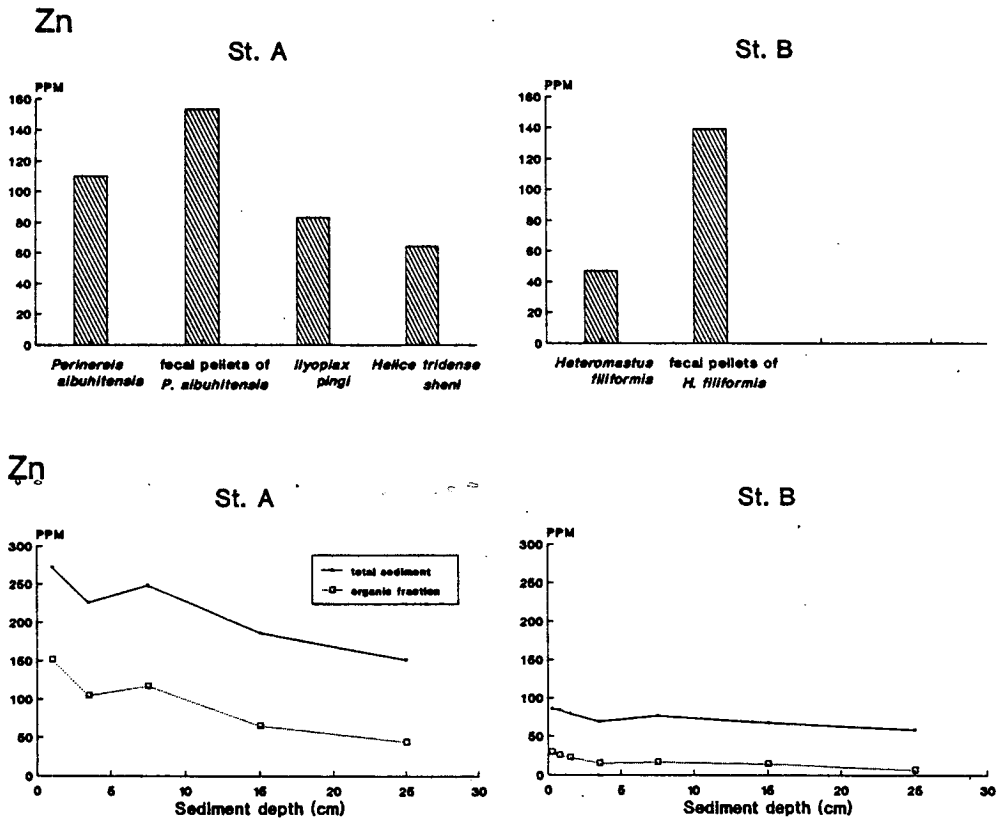


Fig. 8-3. Comparison of Zn content in sediment with that in the inhabiting dominant macrobenthos. Values are from the upper intertidal zone at St. A and the middle intertidal zone at St. B where animals were sampled. PPM: $\mu\text{g/g}$ dry wt.

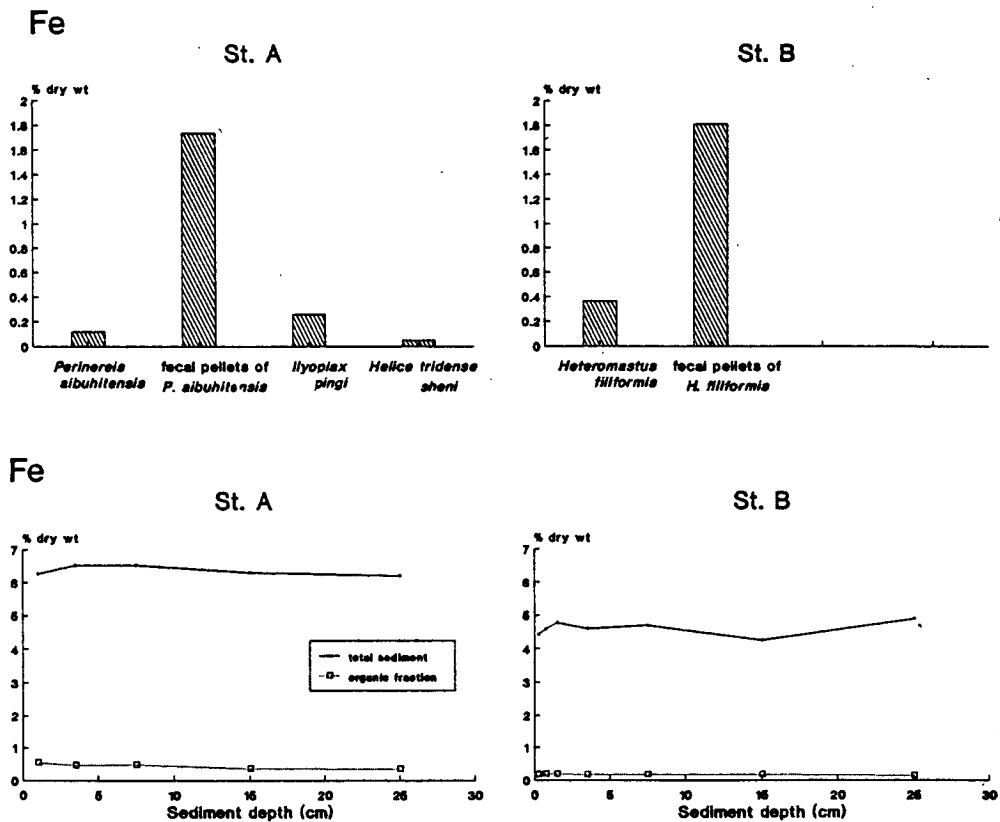


Fig. 8-4. Comparison of Fe content in sediment with that in the inhabiting dominant macrobenthos. Values are from the upper intertidal zone at St. A and the middle intertidal zone at St. B where animals were sampled.

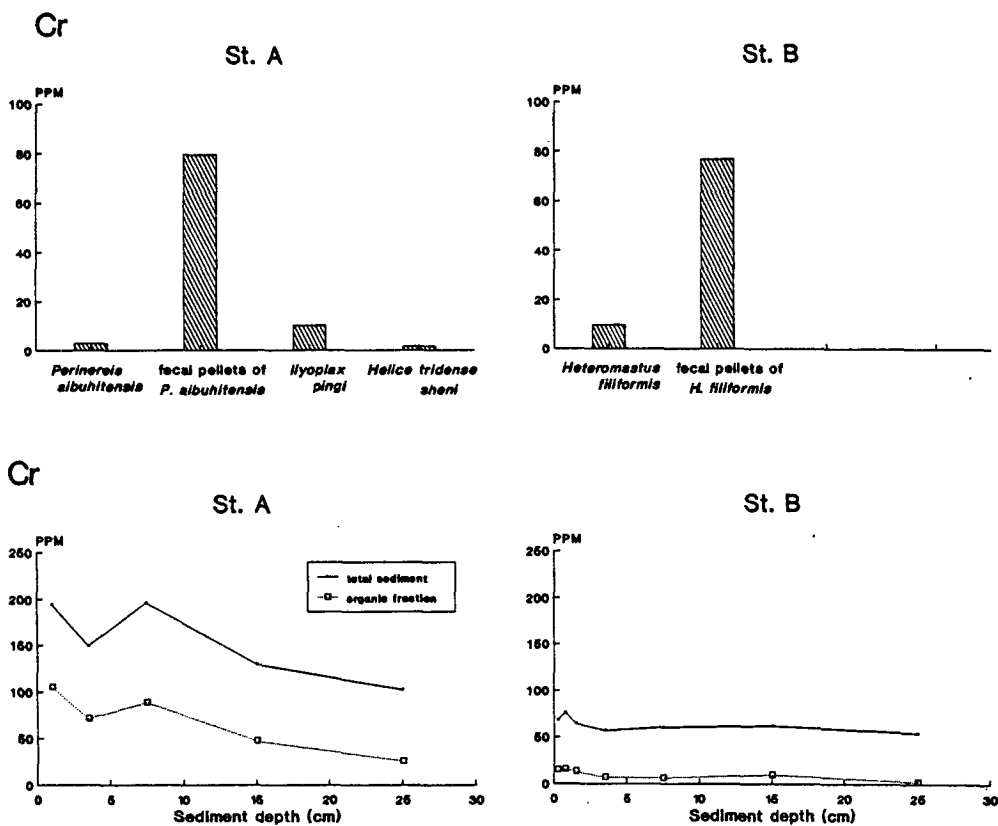


Fig. 8-5. Comparison of Cr content in sediment with that in the inhabiting dominant macrobenthos. Values are from the upper intertidal zone at St. A and the middle intertidal zone at St. B where animals were sampled. PPM: $\mu\text{g/g}$ dry wt.

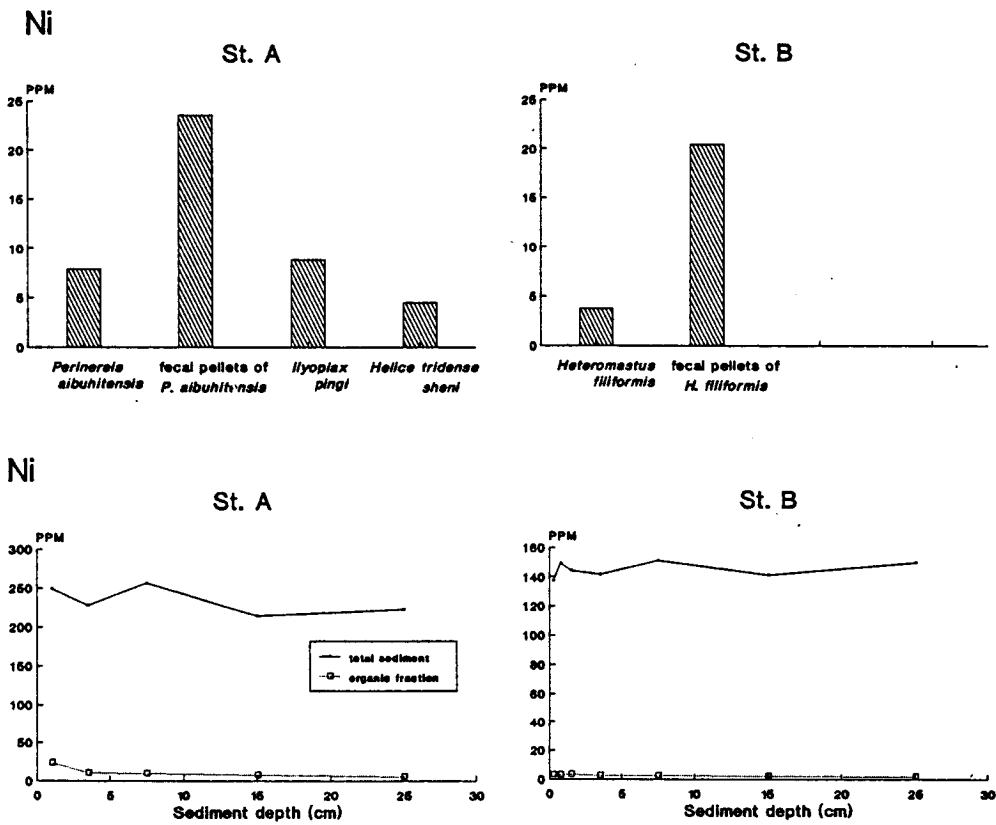


Fig. 8-6. Comparison of Ni content in sediment with that in the inhabiting dominant macrobenthos. Values are from the upper intertidal zone at St. A and the middle intertidal zone at St. B where animals were sampled. PPM: $\mu\text{g/g}$ dry wt.

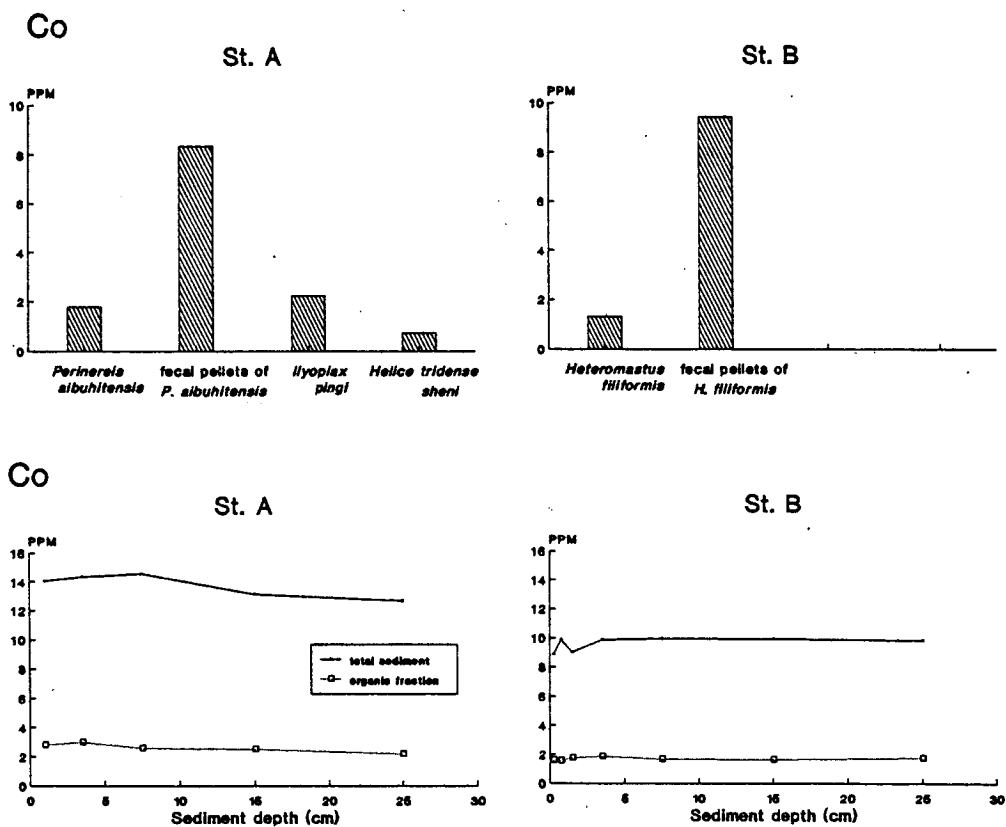


Fig. 8-7. Comparison of Co content in sediment with that in the inhabiting dominant macrobenthos. Values are from the upper intertidal zone at St. A and the middle intertidal zone at St. B where animals were sampled. PPM: $\mu\text{g/g}$ dry wt.

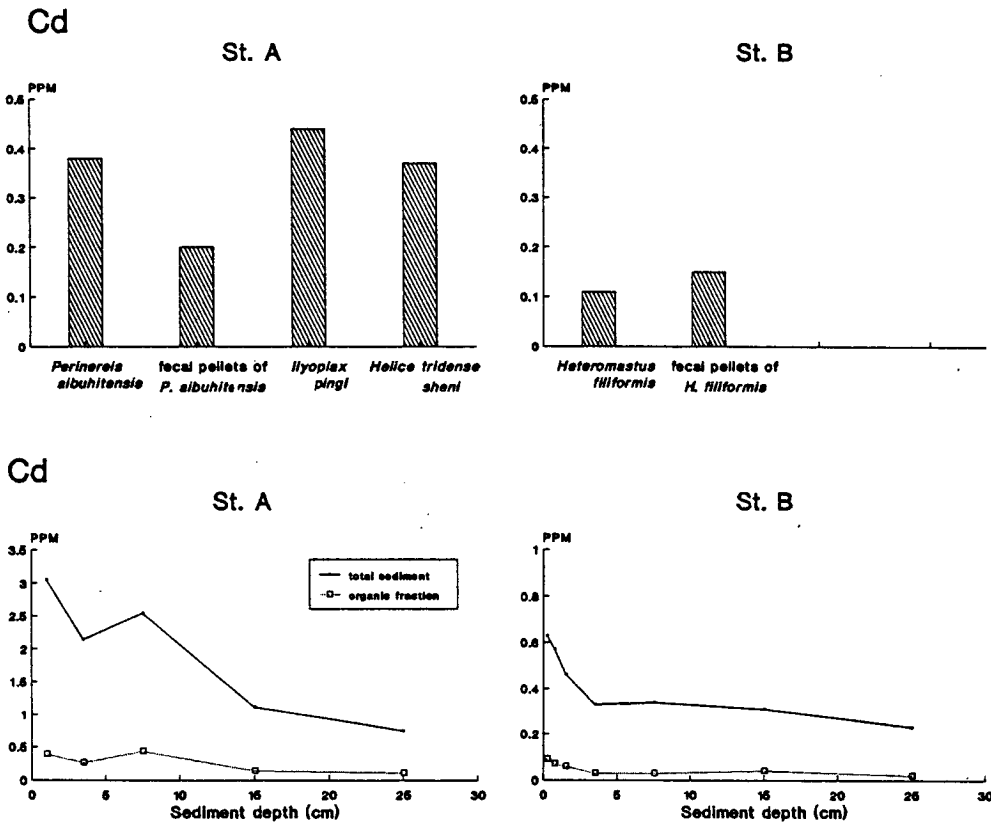


Fig. 8-8. Comparison of Cd content in sediment with that in the inhabiting dominant macrobenthos. Values are from the upper intertidal zone at St. A and the middle intertidal zone at St. B where animals were sampled. PPM: $\mu\text{g/g}$ dry wt.

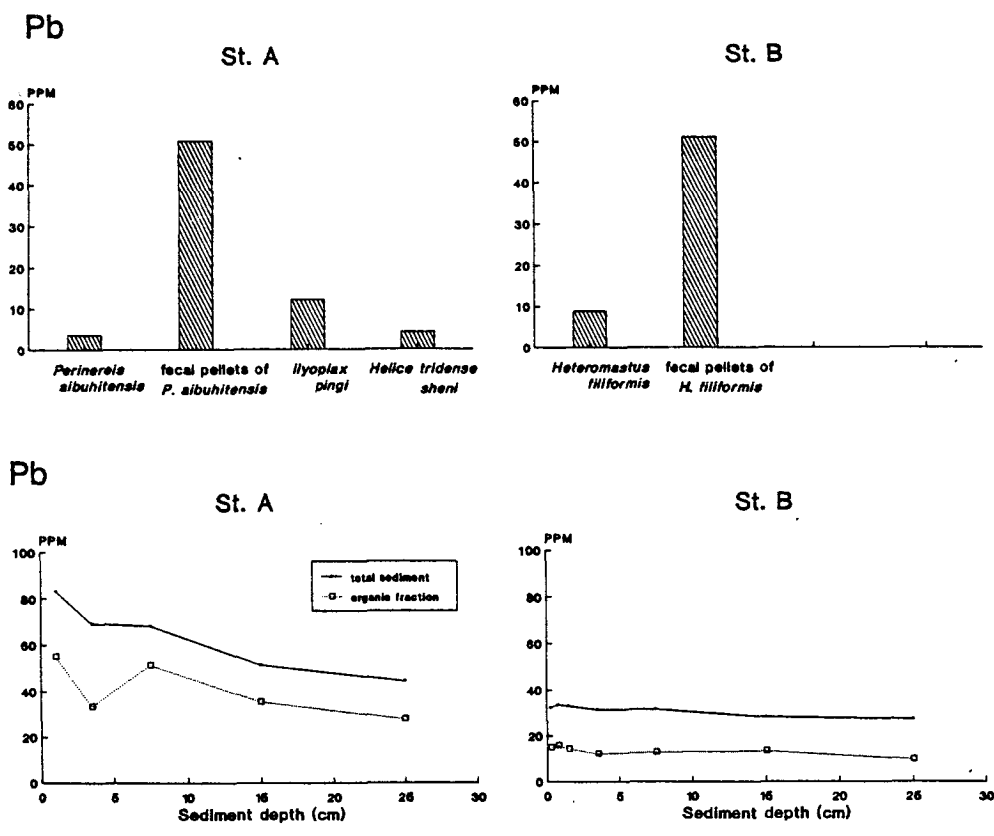


Fig. 8-9. Comparison of Pb content in sediment with that in the inhabiting dominant macrobenthos. Values are from the upper intertidal zone at St. A and the middle intertidal zone at St. B where animals were sampled. PPM: $\mu\text{g/g}$ dry wt.

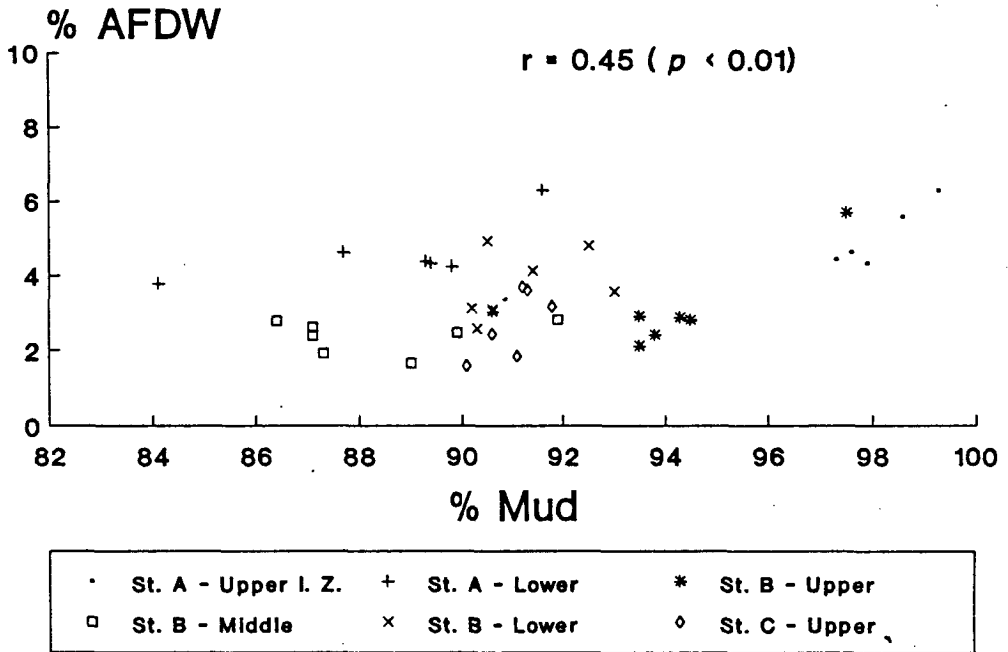


Fig. 9. Relations between the organic carbon content and the mud content of sediment. r : product-moment correlation coefficient.