

D-2. 海洋汚染物質の海洋生態系への取り込み、生物濃縮と物質循環に関する研究
(2) 海洋プランクトンの海洋汚染物質の取り込み及び循環に関する研究

研究代表者

国立環境研究所 高松武次郎

環境庁 国立環境研究所

水圏環境部

部長

渡辺正孝

地球環境研究グループ

海洋研究チーム

原島省・功刀正行

平成5～6年度合計予算額 21,618千円
(平成6年度予算額 11,796千円)

〔要旨〕海洋の食物連鎖で重要な位置を占める動物プランクトンは、海洋での汚染物質の循環に重要な役割を果たすとともに、局所的海域の汚染状況もよく反映する。1986～1994年の夏に日本近海で採取した動物プランクトン、稚魚、及び浮遊魚卵の元素組成（最大37元素）を中性子放射化、ICP-AES及び原子吸光で分析した。その結果の解析から以下の点が明らかになった。（1）動物プランクトンの消化管内にはAl, Sc, Ti, Feなどに富んだ無機物を取り込まれている。（2）その混入量は、硝酸だけで分解した試料と硝酸とフッ化水素酸で分解した試料（いずれも蒸気分解）の分析値の差から概ね評価できる。（3）Pなどの多量必須元素の濃度は、動物プランクトンの個体の大小に関係なくほぼ一定であったが、重金属などの濃度は個体重量が小さくなるほど増加した。（4）多元素の分析結果を用いたMKT-プロットの切片と勾配の比較から、動物プランクトンの汚染状況や重金属蓄積性の評価が可能となった（この方法により、内湾の動物プランクトンは外洋のものより汚染されていることが示された）。（5）MKT-プロットを食物連鎖において動物プランクトンの直上位に位置すると考えられる数種類の魚（稚魚）に適用した結果、プロットの勾配はプランクトンでの値より一般的に大きく、重金属の蓄積が見られた。これは、プランクトン中の重金属が、多分食物連鎖を通してその捕食者である稚魚に移行・濃縮した結果と推測される。また、MKT-プロットの勾配は魚類の卵では一層大きく、魚類に蓄積された重金属が卵に移行し易いことも示唆された。

〔キーワード〕海洋、動物プランクトン、食物連鎖、汚染物質、元素分析

1. 序

人間活動により海洋にもたらされる汚染物質（重金属や有害化学物質など）は、まず一次生産者に摂取され、捕食を通して次第に高次捕食者へと取り込まれて行く。動物プランクトンは、食物連鎖の底辺近くに位置する生物で、海洋での物質循環に重要な役割を果たすとともに、そこに含まれる汚染物質濃度は局所的海域の汚染状況を良く反映する。本研究では、日本近海で採取し

た動物プランクトンの汚染物質濃度を分析し、汚染物質の海洋生態系への取り込み経路と濃縮機構、並びに汚染物質の食物連鎖を通しての循環機構を明らかにしようとした。

2. 実験方法

(1) 試料採取： 動物プランクトン試料は、1986～1994年の7-8月に、日本近海に設けられた測線（海流を横断する様に設けられた5測線、内湾域測線、及び沿岸主要航路上の測線；昭和61年度日本近海海洋汚染実態調査、昭和62年3月参照）（図1）上で、ORIネット（0.328 mm目）の水平曳きを行い、海洋表層（水深150m以浅）から採取した。また、1994年の9月には、日本（新潟）とロシア（ウラジオストック）を結ぶ測線上でも同様に採取した（採取地点は、平成6年度日本海の海洋環境のための共同調査、平成7年3月参照）。なお、試料採取はそれぞれ、環境庁水質保全局が新日本気象海洋（株）に委託した「日本近海海洋汚染実態調査」と「日本海の海洋環境のための共同調査」の中で実施した。

(2) 試料（多種混合試料）の洗浄と保存： 採取した試料は、直ちにXX13ネット（0.095mm目）に移してゴミ等を取り除いた後ポリビンに入れ、0.01M アジ化ナトリウムを含む0.5M ギ酸アンモニウム溶液を少量加えて半凍結状態（-4℃）で実験室に持ち帰った。持ち帰った試料はできるだけ早く0.5M ギ酸アンモニウム溶液で充分洗浄した。洗浄は、1986と1989年の試料については遠沈法で、1990～1993年の試料についてはフルイを用いた方法で行った。遠沈法は、試料を0.5Mギ酸アンモニウム溶液に懸濁させた後、遠沈（3000rpm）で試料を沈澱させて上澄み液を捨てる操作を5回繰り返して行った。フルイによる洗浄は、試料をテフロン製フルイ（ネット目：0.100mm）に移した後、0.5Mギ酸アンモニウム溶液槽に沈めてフルイを上下させて混入物を濾し分け、さらに同溶液を数回に分けて上から掛け流して行った。洗浄した試料はいずれも凍結乾燥を行った後分析に供した。

(3) 種毎に分別した試料の採取、洗浄及び保存： 1989～1994年には、近海の全域において(1)の方法で採取したバルク試料から種毎に分別した動物プランクトン試料を得た。種の分別は、実体顕微鏡下で、竹製のピンセットと針、吸引採取用のガラス細管などを用いて行った。得られた試料は、*Calanus* sp., *Euphausia* sp., *Undinula* sp., *Euchaeta marina*, *Oncaea venusta*, *Temora discaudata*, *Labidocera* sp., *Iasia zonaria*, *Thalia democratica*, *Abylopsis* sp., *Sagitta enflata*, *Sagitta crassa*, *Velella lata*, *Creseis acicula*, *Themisto* sp., *Siphonophorae* sp., *Decapoda* sp., *Portunus trituberculatus*, *Lucifer reynaudii*とAlima, *Erichthus*, *Zoea*及び*Megalopa*幼生などである。また、1994年の日露測線上の調査では、*Idotea metallica*, *Themisto* sp., *Gammaridea*などが採取できた。試料は、遠沈法を用いてバルク試料と同様に洗浄した後凍結乾燥を行い分析に供した。さらに、1991～1992年には、9, 12, 1, 2及び7月の5回東京湾で各約50固体の種別試料の採取を行った。採取した種は、*Sagitta crassa*, *Calanus sinicus*, *Pseudodiaptomus marinus*, *Acartia omorii*, *Centropages abdominalis*, *Euphausia similis*, *Abylopsis* sp., と*Zoea*及びAlima幼生である。試料は、近海試料と同様に処理した。1992～1994年には稚魚と浮遊卵も採取した。稚魚は、ボラ（*Mugil cephalus*）、サンマ（*Cololabis saira*）、カワハギ（*Stephanolepis cirrifer*）、イソギンボ（*Pictiblennius yatabei*）、アミメウマズラハギ（*Cantherhines pardalis*）、ヨウジウオ（*Syngnathus schlegelii*）、タカノハダイ（*Goniistius zonatus*）、カゴカキダイ（*Microcanthus strigatus*）、

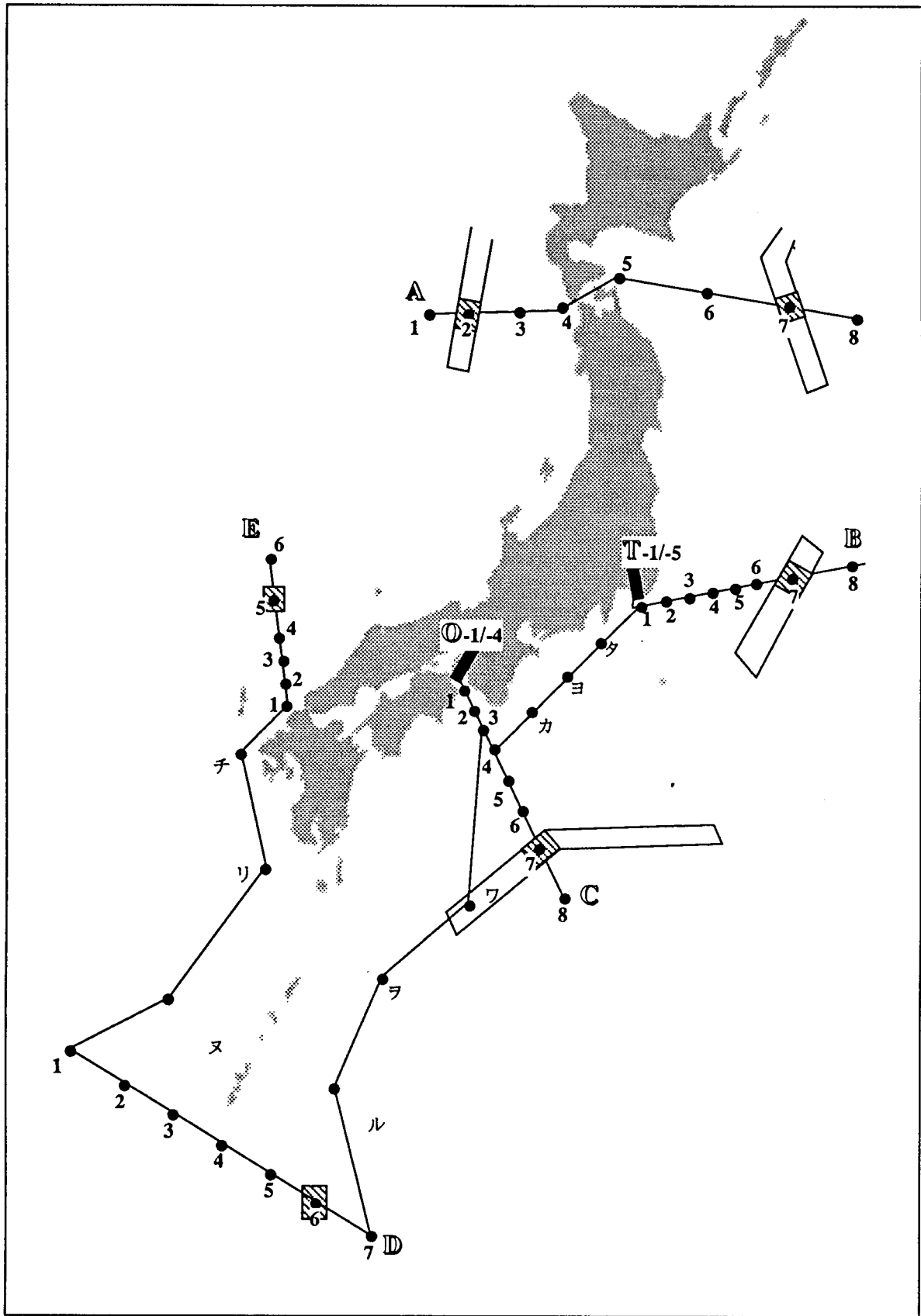


図1 日本近海における動物プランクトンと稚魚の採取地点
 廃棄物の投棄海域

テンジクダイ (*Apogon lineatus*) , オキエソ (*Trachinocephalus myops*) , ネズミギス (*Gonorynchus abbreviatus*) , ウルメイワシ (*Etrumeus teres*) , ハダカイワシ (*Diaphus watasei*) , サヨリ (*Hyporhamphus sajori*) , フサカサゴ科 (*Sebastes* sp.) など、浮遊卵はカタクチイワシ (*Engraulis japonicus*) と数種の魚種不明の魚のものである。試料はプランクトンと同様に洗浄し、分析に供した。

(4) 試料の酸分解： 上で得た乾燥試料の20-50mg (少量しか得られなかった種別試料の場合は採取できた試料の全部) をタフテナーバイアル (テフロン製, 7ml容) に取り (蓋はしない) , あらかじめ硝酸 (1ml) あるいは硝酸 (1ml) とフッ化水素酸 (0.5ml) の混酸を内容器 (テフロン製) に入れたステンレス製高压分解ボンベに納めて分解した (140°C, 6h) 。分解物は3 mlの水に溶解し、その上澄液を分析試料とした。なお、本処理中の汚染を最小限に抑えるため、試料の秤量や分解液の希釈などの操作は、クリーンルーム (クラス1000) あるいはクリーンボックス (Yamato CYH-2) 内で行った。

(5) 分析方法： 上で得たプランクトンの乾燥試料とその酸分解液試料は、中性子放射化分析 (Koyama & Matsushita, 1980; 高松ら, 1994) , ICP-AES (Nishikawa et al., 1986) , 及びフ列ームレス原子吸光法により元素分析した。定量できた元素数は、B, Na, Mg, Al, Si, P, K, Ca, Sc, Ti, V, Cr, Mn, Fe, Co, Ni, Cu, Zn, As, Se, Br, Sr, Mo, Ag, Cd, Sb, Cs, Ba, La, Ce, Sm, Tb, Lu, Ta, Pb, Th及びUの37種である。

3. 結果と考察

日本近海で採取した動物プランクトンの元素分析結果を表1～5にまとめた (但し、1994年に採取した試料の分析は未完了である) 。表1と2はそれぞれ多種混合プランクトンを中性子放射化とICP-AESで分析した結果で、表3と4はそれぞれ種別動物プランクトンと稚魚及び浮遊卵をICP-AESで分析した結果である。また、表5は試料量が豊富であった数種の動物プランクトンを中性子放射化で分析した結果である。

これらの結果の解析から、本研究では以下の点が明らかとなった。

(1) ネットで採取した試料 (多種混合試料) では、しばしば高濃度のAl, Si, Sc, Ti及びFeなどが検出され、無機物の混入が認められた。試料は、0.328mm目の相当に荒いネットで採取したものである。無機浮遊粒子が混入した可能性は少ない。また、試料外部に付着した無機物は、試料の洗浄、特にフルイを用いた洗浄によりほぼ完全に除去されていると思われる。従って、多種混合試料に混入した無機物は、プランクトンの消化器官などに取り込まれたものである可能性が高い。

(2) 硝酸だけで分解した試料と硝酸とフッ酸の混酸で分解した試料の分析値 (後者の値として放射化分析の値を用いることもできる) の差から無機物の混入量とその質が評価できた。また、混入無機物の影響を完全に除くのは不可能であったが、分解に硝酸のみを用いれば、プランクトンの生体組織が持つ本来の元素組成をおおむね知ることができる (この目的には、トリメチルアンモニウムなどによるアルカリ分解も有効と考えられるので将来検討する必要がある) 。また、2種類の酸分解法で得られた分析値の差を地殻や底質の元素組成と比較した結果、Si, Al, K, Ti, Ba, 及びScなどの地殻物質に比較的均一に存在し、しかも可溶化され難い元素では両者の間に非常に良い相関が見られること、一方、人間によく利用され、環境で動き易いためにしばしば特

表1 日本近海で採取した多種混合動物プランクトン試料の元素組成 (中性子放射化分析による)

採取 地点 時期		優占種		ppm																			%		ppm		%		ppm	
		Sm	Ce	Se	Th	Cr	Hf	Ba	Sr	Br	As	Sb	Ag	Cs	Tb	Sc	Fe	Zn	Co	Ta	Na	La	Eu							
カ	86,7	0.34	3.2	3.2	0.96	17	0.42			2460		0.81		0.42		0.36	0.58	720	2.3	0.19			2.3	0.05						
ク	86,7	0.40	4.6	2.5	0.65	44	0.85			1230		1.93		0.99		0.91	1.51	1270	3.3	0.18			3.0	0.11						
キ	86,7		0.9	3.0	3.0	3	1.02		64	4320		0.09		0.05		0.05	0.09	277	0.2					0.02						
ク	86,7			3.6	5	5	1.45			1870						0.10	0.15	476	0.7					0.05						
コ	86,7			2.8	8	8	1.03			2610		0.20		0.10		0.08	0.22	325	0.5					0.04						
ケ	86,7			3.2	6	6	1.07		38	3160		1.60		0.82		0.18	0.32	730	1.0	0.10										
ケ	86,7			3.0			1.00			382						0.01	0.16	193	0.4											
コ	86,7		3.7	5.6		25	1.27			2020		1.14		0.58	0.23	0.60	0.57	1460	6.3	1.79		1.3	0.09							
コ	86,7	0.34	6.9		0.78					713						0.42	0.26	292				3.7								
A-1	89,7		1.3	3.2	0.12	33	0.46	950	510	2230		4.80	0.20	0.09		0.10	0.35	537	1.9	0.22			0.02							
B-2	86,7		4.3	5.5	0.44	105	0.61	560	330	2070	13.0	2.00		1.14		1.03	3.97	1200	6.4	0.46		1.9	0.05							
	89,7			2.9		11		60	36	2420		0.45		0.05		0.07	0.12	223	0.5				0.03							
	90,7			1.2	1.3	23		25	1010	649		0.04	0.08	0.03		0.01	0.01	66	0.1											
B-4	86,7		0.20	1.8	4.6	0.44	2.3	0.74		759	3.5	0.90		0.51	0.79	0.30	0.63	616	7.0	1.10		0.9	0.03							
	89,7		0.11	5.4	1.5		9	0.61	71	96		0.04	0.20	0.03		0.06	0.03	110	0.5			0.06	0.04							
B-8	86,7		0.67	2.5	2.5	1.60	9			452		0.39		0.22	0.10	0.71	0.52	579	2.9	0.03		5.5	0.18							
	89,7		0.6	4.1	2.1			56	66	255		0.04	0.20	0.04		0.11	0.06	113	0.5				0.02							
	90,7			0.9	0.9			117	2630	400		0.16				0.02	0.05	167	2.6	0.10				0.67						
C-3	86,7		21.5	3.4	0.87	30	0.81			1170		0.59		0.39		0.70	0.68	892	2.0	0.14		12.3	0.09							
	90,7		0.8	1.9	0.04	15		48	1210	698	35.0	0.12				0.08	0.07	77	0.7	0.02				3.55						
	92,7		12.0	2.3		33			2390	320	4.4	8.20				0.05	0.56	269	2.6	0.34		0.92		6.4						
C-5	86,7			2.3		5	0.74			1270		0.24		0.13		0.04	0.29	307	0.6					0.05						
	89,7			2.3	0.06	1.4		40	25	650		0.02	0.20	0.02		0.03	0.07	166	0.2	0.01				0.02						
C-8	86,7		4.7	2.3	0.72	17	0.95			1470		0.63		0.36		0.29	0.36	583	1.2			1.9	0.08							
	89,7		2.4	2.8		5.8		30	62	501		0.29				0.03	1.07	153	2.9				0.01							
	90,7			1.4		4.8		14	429	480		0.20	0.12			0.02	0.04	83	1.4	0.18				3.39						
D-1	86,7			2.3			0.98			1440		0.10		0.06		0.03	0.07	162	0.3					0.13						
	90,7		0.6	1.5	0.06	12				459	19.0	0.25		0.03		0.05	0.10	125	0.2	0.05				1.98						
D-4	86,7		0.62	8.7	2.8	1.40	7	0.54		618	3.5	0.18		0.10	0.11	0.50	0.35	154	0.9			5.1	0.12							
	92,7			1.7		1.2			375	132	2.2					0.01	0.02	102	4.1	0.65				1.80						
D-7	86,7		1.6	2.9	0.28	10	1.09			260	2100	8.8	0.17	0.10		0.25	0.30	361	1.2	0.04		1.2	0.05							
	90,7			3.0		297		50	1156	562		0.08		0.07		0.02	0.09	82	0.7					0.79						
E-1	86,7		0.81	2.0	1.96	21	0.56			320	326	5.9	2.62	1.47	0.14	2.21	0.99	368	2.2	0.18		4.2	0.18							
E-3	86,7		4.1	2.2	0.40	14	0.71	600	56	1000		0.37		0.21		0.49	0.55	686	0.9	0.14		1.2	0.05							
O-2	86,7		0.86	1.7	1.5	1.65	17	0.61		310	448	2.27		1.26	0.13	1.85	0.65	229	2.1	0.15		4.0	0.14							
	89,7		0.19	7.7	1.9	1.20	16	0.47	90	290	440	2.40		0.63	0.03	0.92	2.54	426	3.2	0.17		4.0	0.12							
	92,7			1.4		6.3			1210	449		0.20				0.02	1.60	468	1.6	0.06				0.72						
O-4	86,7		0.54	2.1	2.4	1.18	14	0.43		210	1220	1.72		0.96		1.28	0.61	497	1.5			2.2	0.12							
	89,7		0.9	2.1	0.08	3.2		33	110	4000		0.42		0.07		0.08	0.06	202	0.6	0.08				0.03						
T-2	86,7		2.0	1.9		38	0.68			1300	5.8	0.28		0.15		0.65	0.50	649	2.5			1.1	0.05							
	92,7		0.42	5.7	1.8	0.66	17	0.27		403		0.70	0.80	0.43	0.10	1.20	0.52	263	2.4	0.10		1.30		0.06						
T-3	89,7		1.2	3.2	0.33	19	0.20	47	170	1190		9.00	0.60	0.30	0.08	0.88	0.44	469	2.7	0.12		1.3	0.02							
T-4	86,7		1.2	3.0		33	1.15			2450		0.24		0.13		0.39	0.26	403	0.8					0.05						
	89,7		1.0	2.7	0.15	9.5	0.11	69	66	2260		0.40	0.20	0.11		0.44	0.31	342	1.5	0.06				0.03						
	90,7		1.4	2.8	0.23	5.5	0.94	144	1850	867		2.30	0.16	0.38		0.36	2.05	629	6.0	0.45				3.32						
	92,7		0.65	4.8		0.71	10	0.36		63	294	0.60				1.50	0.77	982	2.1			1.6	0.16							

値は凍結乾燥重当たり

表2 日本近海で採取した多種混合動物プランクトン試料の元素組成 (ICP-AESによる)

採取 地点	時期	低占種	%														ppm									
			Ca	Mg	Na	P	Al	As	B	Ba	Cd	Cr	Cu	Fe	K	Mn	Mo	Ni	Pb	Se	Si	Sr	Ti	V	Zn	
A-1	93,8	<i>Calanus plumchrus</i> , <i>Metridia</i> sp.	2.65	1.42	3.35	1.92	360	55	34	15	9.3	9.9	64	3150	1870	31	3.5	14	19	68	210	390	37	6	1350	
A-3	93,8	<i>Oikopleura</i> sp., <i>Metridia</i> sp.	1.11	0.37	1.55	0.16	2380	29	19	30	1.8	24.0	67	3080	740	81	8.7	28	48	60	370	260	250	13	1930	
B-2	93,8	<i>Vorticellidae</i> , <i>Siphonophora</i>	3.99	0.54	1.88	0.14	1605	33	69	35	2.9	18.0	81	2600	1260	31	2.6	21	18	32	1085	960	63	18	1670	
B-4	93,8	<i>Vorticellidae</i> , <i>Sphaerozoum</i> sp.	0.60	0.09	0.22	3.44	140	310	92	14	21.0	13.0	41200	1480	0	18	63.0	37	390	460	54	85	34	9	47400	
B-8	93,8	<i>Radiolaria</i> , <i>Oithona plumifera</i>	1.42	0.78	0.78	0.71	2490	34	15	21	1.8	20.0	27	4210	710	91	0.4	13	25	44	210	130	28	7	530	
C-3	92,7		6.27	0.84	1.93	2.53	32	10	10	52	1.4	2.8	11	354	910	8	0.9	4	4	4	33	1105	5	1	124	
C-5	92,7		0.56	1.06	5.80	0.13	310	19	19	9	1.0	130.0	28	4430	1840	34	2.4	23	42	8	14	95	14	2	1060	
C-8	92,7		0.44	0.32	1.71	0.32	27	11	16	6	12.0	1.2	26	220	530	5	4	4	11	11	19	76	1	320		
D-1	92,7		1.30	0.43	1.65	0.53	79	19	6	33	21.0	200	690	550	7	4.0	16	12	28	22	6260	3	3	9220		
D-4	92,7		2.32	0.73	2.14	1.46	33	8	6	43	0.7	4.1	22	262	1145	7	0.8	4	2	3	17	475	3	1	330	
D-7	92,7		1.48	0.37	0.93	0.07	330	17	22	70	0.8	3.7	9	705	375	13	0.5	37	5	5	6	440	3	2	170	
E-1	92,7		4.98	1.02	2.71	1.10	310	20	15	150	42.0	88	5020	950	48	25	25	150	5	56	15400	20	5	570		
E-3	92,7		3.66	1.03	4.44	0.25	58	7	22	71	2.5	25	25	190	1400	5	8	8	5	32	1710	2	1	100		
E-6	92,7		2.57	1.30	7.62	0.26	110	9	25	13	3.2	1.2	3	230	2680	5	4	4	63	290	4	4	70			
O-2	92,7		4.30	0.99	0.80	2.28	280	13	11	44	15.8	12	490	185	74	1.1	8	170	10	27	820	8	1	930		
O-4	92,7		2.90	0.35	1.03	1.25	650	24	4	16	7.3	16	890	500	16	1.8	10	41	5	45	200	14	2	240		
T-2	93,8	<i>Amphorellopsis acuta</i> , <i>Pseudodiaptomus marinus</i>	2.43	0.35	1.87	0.14	5320	19	12	45	0.8	41.5	61	5780	1140	125	1.1	28	19	18	85	150	36	17	375	
T-4	93,8	<i>Vorticellidae</i> , <i>Penilia avirostris</i>	1.81	0.24	0.61	0.13	3635	17	11	22	1.4	17.0	38	4905	690	165	1.7	19	24	17	760	175	170	16	1215	

値は凍結乾燥重当たり。

表3 日本近海で採取した各種動物プランクトンの元素組成 (ICP-AESによる)

試料 種名	採取 地点	時期	%										ppm												
			Ca	Mg	Na	P	Al	As	B	Ba	Cd	Cr	Cu	Fe	K	Mn	Mo	Ni	Pb	Se	Si	Sr	Ti	V	Zn
<i>Sagitta crassa</i>	Tokyo B.	91,12 92,2	0.021 4.395	0.030 3.350	0.041 0.148	0.39 5.25	1665 170		21 6		34 6			1430 2085	240 62	54 205		21 9	45 8		85 38		700 17		325 590
<i>Calanus sinicus</i>	Tokyo B.	91,12 92,2	0.032 0.053	0.005 0.008	0.053 0.062	0.42 0.37	448 65							1270 295										285 565	
<i>Euphausia similis</i>	O-2 C-3	92,7	0.017 6.390	0.013 1.800	0.055 0.540	0.20 4.20	110 200	6 12						330 200	260 210									150 280	
<i>Euphausia sp.</i>	A-1	93,8	2.040	1.430	0.420	2.58	220	37	14	13	16	41	74	470	300	26	15	5	20	65	190	260	20	5	1840
<i>Themisto sp.</i>	A-1 A-3	93,8 93,8	5.180 3.490	1.038 1.030	1.065 0.500	2.07 2.12	300 100	37 40	17 18	15 53	17 53	55 80	66 81	1105 530	578 160	34 59	3.3 3.3	73 74	12 14	56 77	53 39	663 450	13 9	5 8	1090 700
<i>Iasis zonaria</i>	C-3	92,7	0.790	0.675	3.265	0.16	160	20		8			18	140	1090				7	86	91	7		49	
<i>Lapidocera sp.</i>	D-7	92,7	0.020	0.005	0.024	0.29	120						41	240	130			21	66		54			710	
<i>Criseis acicula</i>	E-6	92,7	27.80	0.059	0.330	0.15	82	19		4				95		3		6		20	82	400	6		130
<i>Decapoda (large)</i>	D-4	92,7	2.860	0.808	2.075	1.83	12	5	5	31	1	2	11	88	1073	7	0.3	5	1		10	538	3	1	168
<i>Decapoda (small)</i>	D-4	92,7	3.460	0.560	0.750	2.13	19	10	2	120		3	8	41	300	13		8		4	12	690	2	2	300
<i>Velella sp.</i>	D-7 B-8	92,7 93,8	0.018 0.240	0.007 0.250	0.021 1.110	0.27 0.21	130 110		12 3		2 2		22 10	580 570	500 39	7	1.4	28	5	16	94	76	120	3	450 140
<i>Siphonophorae</i>	C-5 B-8	92,7 93,8	0.170 0.058	0.520 0.048	2.700 0.260	0.03 0.17	110 1910	65 130	19 26	42 13				6990 3950	570 990	39 53		150	220	30	130	35		120 240	
<i>Stomatopoda</i>	C-8	92,7	5.710	0.820	0.300	2.88	25	6	2	67		4	8	44	76	9		8		4	18	990	4	120	
<i>Calanoida</i>	B-8	93,8	0.024	0.010	0.046	0.19	610		29	2	9	74	43	970	73	12	15.0	140	53	200	240		11	26	880
<i>Pterosoma planum</i>	D-7	92,7	0.340	1.100	5.740	0.08	170	10	4	6		74		640	1940	12	2.6	34			120	71	9	45	
<i>Zoea larva</i>	Tokyo B. O-2 E-1	92,1 92,7	21.56 0.190 4.500	7.690 0.056 0.900	8.410 0.250 0.210	15.62 0.35 2.34	360 410 38	34 20 13	50 2 72	103 6		25 4	78 5	580 350	6580 250	332		39	40	180	4220	22		2380 270 160	
<i>Alima larva</i>	O-2 O-4	92,7	0.098 0.250	0.110 0.470	0.010 0.016	0.20 0.84	9 38	4 20	2 9	2 6			4 18	11 62	1 74	18		1	3	7	5	13		11 51	
<i>Portunidae</i>	O-4 B-2	92,7 93,8	15.10 9.260	1.050 0.940	0.390 0.860	1.61 1.17	340 84	17 43	11 17	37 20	6	1	63	470 15	87 180	78 1010	33	1.5	25	4	29	1740	17 9	100 6	120

値は濃結乾燥重当たり

表4 日本近海で採取した稚魚と浮遊卵の元素組成 (ICP-AESによる)

試料 種名	採取 地点	時期	%										ppm													
			Ca	Mg	Na	P	Al	As	B	Ba	Cd	Cr	Cu	Fe	K	Mn	Mo	Ni	Pb	Se	Si	Sr	Ti	V	Zn	
(Fishes)																										
<i>Mugil cephalus</i>	A-1	93.8	5.520	0.530	0.170	3.870	15	17	17	7.8	2.1	5.2	9.9	120	980	12	1	11	0.1	29	11	220	2.7	2	260	
<i>Cololabis saira</i>	A-3	93.8	6.840	0.290	0.088	4.230	51	15	14	26	5.8	9.8	450	290	170	29		24	17	63	370	5.1	2.3	410		
<i>Stephanolepis cirrhifer</i>	B-2	93.8	5.060	0.330	0.630	3.320	20	18	23	24	0.9	2.9	6.7	95	4100	22	0.5	4.9	0.4	17	260	270	3.4	1.5	140	
Unknown species	E-6	92.7	3.780	0.100	0.072	0.830	75	14		16		2.4	5.4	88		7.2	7.2				72	280			260	
(Pelagic eggs)																										
<i>Engraulis japonicus</i>	T-2	93.8	0.036	0.029	0.090	0.520	120	14	3.3	4.1	1.2	120	21	650	24	5.8	3.1	70	8.3	19	35	7.6	6.4	3.2	690	
	T-4	93.8	0.020	0.012	0.030	0.510	83	0.6	1.4	0.5	0.6	13	16	260		7.3	3.6	25	7.1	19	34	1.2	2	1.3	1890	
Unknown species	C-3	92.7	0.010	0.010	0.040	0.190							0.4	15					6.5						160	
	C-5	92.7	0.017	0.058	0.250	0.190	0.9	6.5	1.4				19	8.8			5.4		3.4	3.9	3.1			500		
	C-8	92.7	0.002	0.002	0.005	0.190	8.6						21	24				6.4		5.9				180		
	B-2	93.8	0.011	0.025	0.120	0.170	28	8.6	2.2		0.7	23	23	180	47	2.6	3	39	9.4	14	0.6	2	1.8	4.7	540	
	B-8	93.8	0.035	0.007	0.016	0.230	22	14	4.7		2.5	15	15	100		1.8	5	43	16	36		1.8	0.9	2.2	310	

値は凍結乾燥重当たり。

表5 日本近海で採取した各種動物プランクトンと稚魚の元素組成 (中性子放射化学分析による)

Sample Species	Sampling site	period	ppm														%							
			Sm	Ce	Se	Th	Cr	Hf	Ba	Sr	Br	As	Sb	Ag	Cs	Tb	Sc	Fe	Zn	Co	Ta	Na	La	Eu
(Zooplanktons)																								
Allma larva	O-2	92,7			0.97					1184	158						0.02	91	290	0.12			1.4	
Decapoda (large)	D-4	92,7			1.06					841	162			0.3				121	148	0.07			2.13	
Decapoda (small)	D-4	92,7			0.97				160	1310	146							118	309				0.81	
<i>Euphausia similis</i>	C-3	92,7			2.5					2400	378						0.03		249				0.6	
(Fishes)																								
<i>Stephanolepis cirrifer</i>	B-2	93,8			1.8					370	63						0.01	115	107	0.07			0.58	

値は凍結乾燥重当たり。

定の環境に偏在する重金属などは、プランクトン試料に混入した無機物に比較的高濃度で含まれることが明らかとなった。この富化された重金属種の組成は廃棄物汚泥のものと類似していたので、混入無機物は、底質粒子と人間活動を反映した浮遊粒子（例えば投棄汚泥など）で構成されていた可能性が高い。

（３）沿岸、特に東京湾、大阪湾及び博多湾の近傍で採取された多種混合試料では、硝酸／フッ化水素酸分解で得た分析値（又は放射化分析の値）で比較すると、亜鉛、銅及び鉛などの重金属類の濃度が高い傾向にある。また、日本海側、特に博多湾沖の測線上の試料でしばしば高濃度の重金属が検出されることや、日本海の試料は亜鉛に比べ鉛を比較的多量に含むことが特徴的であった。（２）の方法を適用して元素が存在する画分を分別して考察した結果、これらの重金属の多くは、混入無機物に含まれて存在すると判断されたので、上記の地域で採取したプランクトンはそれらの重金属に富む無機物を取り込んでいた可能性が高い。

（４）種別に分別した試料の分析値からは動物プランクトン１個体当りの元素含有量も算出できたので、従来の試料重量当りの濃度の他に動物プランクトンの元素組成に関する新しい情報（個体元素含有量）を得ることができた。それを用いて、動物プランクトンの元素組成とプランクトンの種類や個体重量との関係を検討した結果、アルカリ土類金属（Ca, Mgなど）の濃度は、プランクトンの甲殻の有無とその性質に大きく左右された。一方、重金属などの微量元素の濃度は、甲殻を持つ種では甲殻が個体重量の相当部分を占めるために見かけ上希釈され、低くなる傾向が見られたものの、明確な種特性は確認されなかった。図２は、これまでに種別に分画できた動物プランクトン33試料（18属）の分析結果に基づいて、元素濃度（Zn, Fe及びPについて）を動物プランクトン１個体当りの重量との関係で示したものである。動物プランクトンの個体重量は、0.002mg（*Acartia omorii*）から16.0mg（*Portunus trituberculatus*）まで変動したが、Pなどの必須多量元素の濃度は、試料ごとの変動は大きかった（最大で約2桁）ものの、個体重量とは無関係にほぼ一定していた。一方、重金属などの微量元素の濃度は、個体重量の減少に伴って増加する傾向を示し、微小な動物プランクトンほど高濃度の重金属を含むことが示された。しかし、微小なプランクトンでは、体表面積が相対的に大きいために、洗浄操作でコンタミを完全に除去できなかった可能性もあり、今後の詳しい検討が必要である。

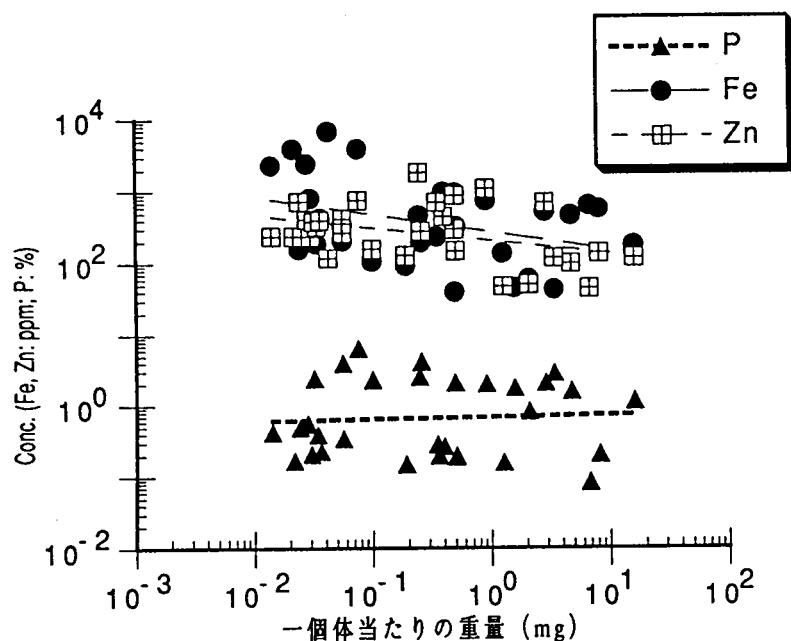


図２ 動物プランクトンの
元素濃度と個体重量
との関係

(5) 動物プランクトンに関する多元素の分析結果を用いて、MKT-プロット (Masuzawa et al., 1988) を行い、その切片と勾配を比較・検討した結果、この方法で動物プランクトンの汚染状況や重金属蓄積性に関する種特性が評価できることが分かった (Takamatsu et al., 1993)。図3は1990年に外洋で採取した6試料 (多種混合) について、海水濃度を基準とした元素の濃縮係数 (CF_{sw}) の平均値を海洋での元素の滞留時間 (τ_R) との関係で示したものである。プロットの変動は二桁に及ぶが、ほぼ-1の勾配のlog-log直線性が成立する。現在この法則性の意味は明らかになっていないが、元素が海水から除去される過程で動物プランクトンが重要な役割を果たしている証拠と考えられる。もしそうであれば、重金属などによる海洋汚染は動物プランクトンの元素濃度に直接反映され、ひいては食物連鎖を通して高次捕食者に移行している可能性が高い。図4aでは、同一の試料について、 CF_{sw} と τ_R との積を CF_{sw} との関係で示した (MKT-プロット)。積は、 CF_{sw} が7桁も変動するにも拘らず、ほぼ一定値を示した。 $\tau_R \times CF_{sw}$ は $36,100 \times CF_{sw}$ (CF_{sw} は元素の河川水中濃度を基準にした濃縮係数) で与えられるので、動物プランクトンに含まれる元素は河川水中濃度に関してほぼ一定の濃縮度を示すと言える。この新しい法則性は動物プランクトンの汚染度を評価する良い指標となる。図4bは東京湾で採取した試料 (多種混合) についての結果である。プロットは、外洋のプランクトンの場合と異なり、正の勾配 (+0.135) を示している。種別に分けた試料でも *Euphausia* sp. や *Megalopa* で正の勾配を示すものがしばしば見いだされた。汚染が無い場合にはプロットは勾配を持たないはずであるので (理由については未解明)、この正の勾配は有効な汚染の尺度と考えられる。しかし、図4は放射化分析の結果を用いたプロットであるので、汚染物質が生体組織中に取り込まれているか、あるいは消化管中の摂食物に由来するかについては特定できない。また、多種混合や種別動物プランクトンの硝酸分解/ICP-AESの分析結果 (表2と3) を用いてMKT-プロットを行い、その勾配を試料の採取地点との関係で比較すると、勾配はやはり内湾や沿岸の試料で明らかに大きくなった (図5)。この結果は、内湾や沿岸の動物プランクトンでは、重金属が生体組織内にも蓄積される傾向にあることを示唆している。

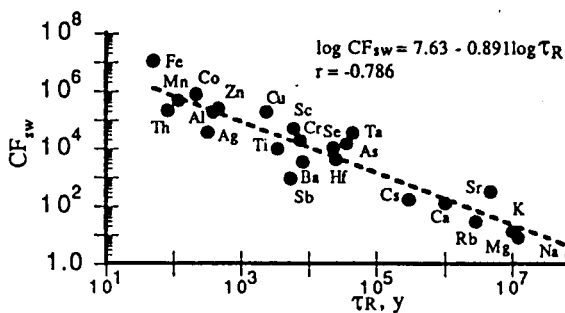


図3 外洋動物プランクトン (多種混合) 試料についての CF_{sw} と τ_R の関係

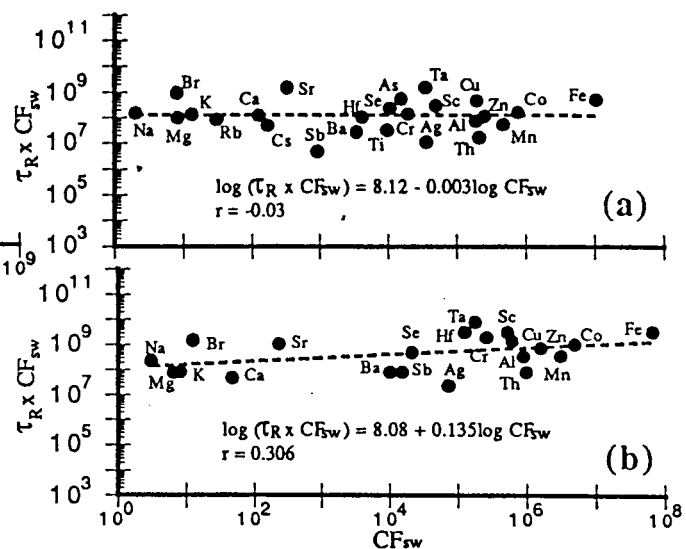


図4 外洋 (a) と東京湾 (b) の動物プランクトン (多種混合) 試料についてのMKT-プロット ($\tau_R \times CF_{sw}$ と CF_{sw} との関係)

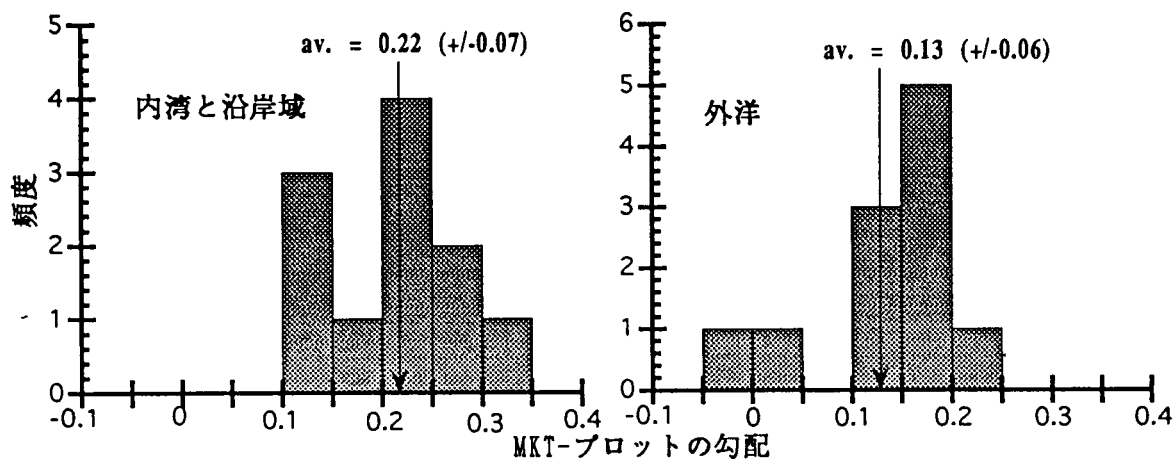


図5 MKT-プロット勾配の頻度分布の海域間比較

多種混合及び種別動物プランクトンの硝酸分解／ICP-AES分析結果
(表2と3)を用いて解析

(6) MKT-プロットを稚魚(ボラ, *Mugil cephalus*; サンマ, *Cololabis saira*; カワハギ, *Stephanolepis cirrhifer*)と浮遊魚卵にも適用し、その元素組成の特性を抽出した(図6)。稚魚は動物プランクトンの捕食者であるので、食物連鎖を通して重金属などを蓄積している可能性がある。稚魚の場合、プロットの切片は(7.36 ± 0.19)で、動物プランクトン(7.38 ± 0.32)とほぼ同等であったが、勾配は0.12~0.30の比較的高い値を示した。稚魚は、洗浄が容易で、コンタミの影響は少ないと考えられるので(但し、消化管内容物は除去していない)、動物プランクトンに比べて重金属を濃縮していると言える。また、浮遊魚卵(カタクチイワシ, *Engraulis japonicus*と魚種不明の卵)についても同様の解析を行った結果、いずれの試料でも若干低い切片(平均で6.59)と高い勾配(平均で0.39)が得られ(図7)、魚類に蓄積された重金属などが卵に移行していることが示された。

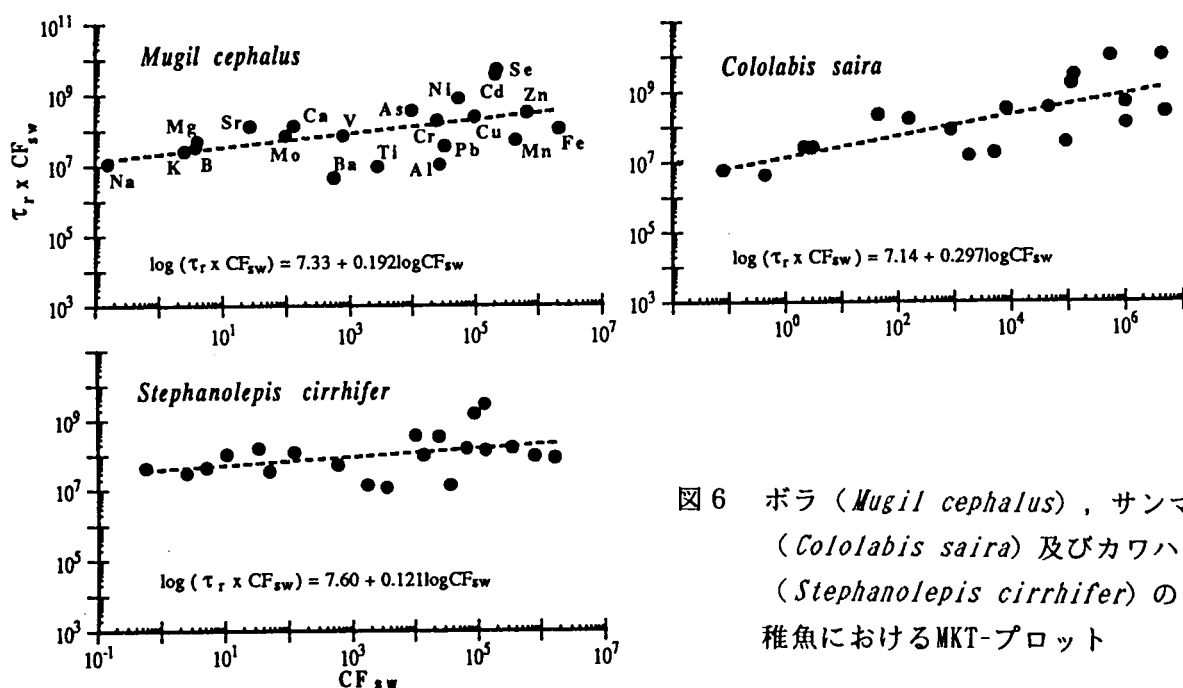


図6 ボラ (*Mugil cephalus*)、サンマ (*Cololabis saira*) 及びカワハギ (*Stephanolepis cirrhifer*) の稚魚におけるMKT-プロット

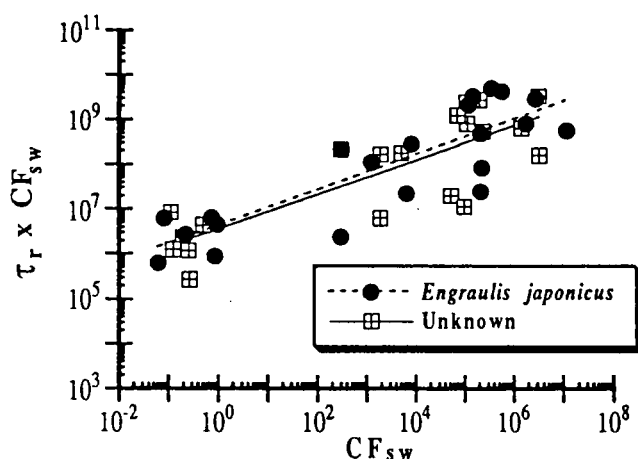


図7 浮遊魚卵におけるMKT-プロット

E. japonicus:

$$\log(\tau_r \times CF_{sw}) = 6.61 + 0.397 \log CF_{sw}$$

Unknown:

$$\log(\tau_r \times CF_{sw}) = 6.57 + 0.385 \log CF_{sw}$$

以上の結果から、MKT-プロットは動物プランクトンの重金属汚染の状況を把握するための非常に有効な方法であり、食物連鎖を通しての重金属の移行の解析にも利用できることが明らかとなった。今後、汚染度の異なる色々な海域の試料の元素組成に関するデータを集積し、この方法で解析すれば、図8に模式的に示した様な結果が得られ、動物プランクトンや魚類の汚染が厳密に評価出来るようになると期待される。

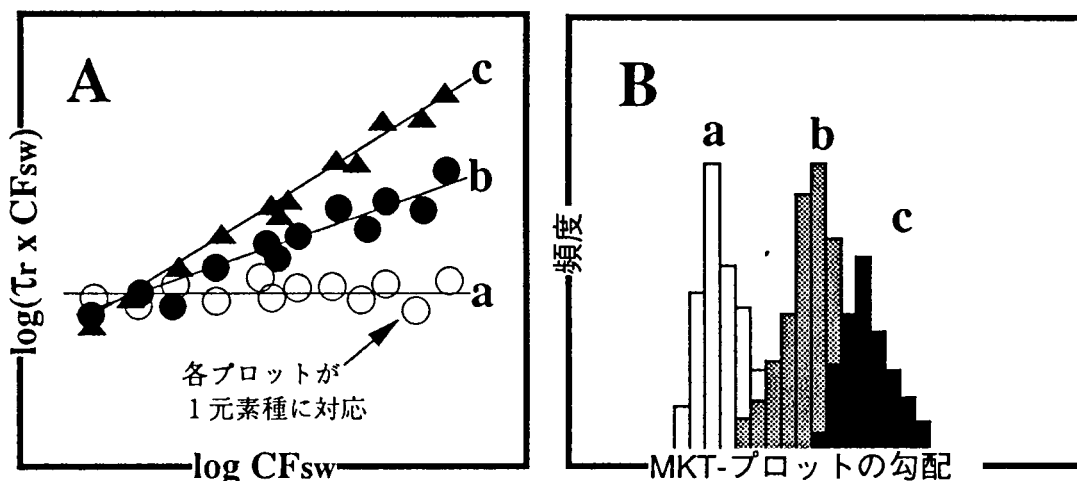


図8 MKT-プロット(A)とプロット勾配の頻度分布(B)の模式図

(a) 非汚染海域の動物プランクトン, (b) 汚染海域の動物プランクトン, (c) 食物連鎖上の高次捕食者(魚など)

4. 引用文献

- Koyama, M. & R. Matsushita: Use of neutron spectrum sensitive monitors for instrumental neutron activation analysis. Bull. Inst. Chem. Res., Kyoto Univ., 58, 235-243(1980).
- Masuzawa, T., M. Koyama & M. Terazaki: A regularity in trace element contents of marine zooplankton species. Marine Biol., 97, 587-591(1988)

Nishikawa, M., Y. Ambe & S. Chubachi: Concentrations of trace elements in surface snow in the area near Syowa Station, Antarctica. Mem. Natl Inst. Polar Res., Spec. Issue, 45, 47-55(1986).

Takamatsu, T., M. Kawashima, T. Masuzawa, J. Takada & R. Matsushita: Geochemical study of trace elements in the hydrosphere by neutron activation analysis. - Evaluation of pollutant levels in zooplankton based on regularity of elemental composition -. KURRI Prog. Rep. 1992: Sec. I, 208-209(1993)

高松武次郎・川嶋宗継・増澤敏行：放射化分析，第8章，海洋化学序説（藤永太一郎編），印刷中，京都大学学術出版会，京都(1995)。

発表の状況

Takamatsu, T., M. Kawashima, T. Masuzawa, J. Takada & R. Matsushita: Geochemical study of trace elements in the hydrosphere by neutron activation analysis. - Evaluation of pollutant levels in zooplankton based on regularity of elemental composition -. KURRI Prog. Rep. 1992: Sec. I, 208-209(1993)

高松武次郎・川嶋宗継・増澤敏行：放射化分析，第8章，海洋化学序説（藤永太一郎編），印刷中，京都大学学術出版会，京都(1995)。