

## 東京湾海底堆積物の重金属汚染

陶 正史\*・峯 正之\*・岩本孝二\*・当重 弘\*\*

### HEAVY METAL POLLUTION OF BOTTOM SEDIMENTS IN TOKYO BAY

Masashi Sue\*, Masayuki Mine\*, Koji Iwamoto\* and Hiroshi Toju\*\*

*Received 1980 September 16*

#### Abstract

The horizontal and vertical distributions of chromium, zinc, copper, lead and nickel in the sediments in Tokyo Bay were determined. The concentration value at each sampling station seemed to be constant in the deeper part of the vertical distribution. This constant value was taken as the background concentration at each station. The amounts of artificial accumulation of these heavy metals were estimated at each station by integrating the values which exceeded the background concentrations. These values were 30~2,900 for chromium, 100~8,600 for zinc, 40~2,500 for copper, 70~1,700 for lead and 30~250 for nickel in units of  $\mu\text{g}/\text{cm}^2$  respectively. Moreover they were higher at the head and middle parts of the bay, but artificial accumulation was scarcely found at the entrance.

From the horizontal distribution of these values, total amounts of artificial accumulation of the heavy metals in Tokyo Bay were respectively found to be in tons, 5,300 for chromium, 21,000 for zinc, 3,400 for copper, 4,500 for lead, and 600 for nickel.

#### 1. はじめに

東京湾は沿岸部に大都市及び大規模工業地帯が集中し、また、地勢的には狭い湾口によって、かなり閉鎖性の強い内湾であるため、生活排水及び工場廃液による海洋汚染は相当に進行しているものと考えられる。海洋汚染の実態とその推移を定量的に把握し、さらに将来予測に関する知見を得るためには、汚染物質の負荷及び海洋環境中におけるその物理的・化学的・生物学的挙動を解明し、汚染物質の物質収支を明らかにすることが必要であるが、これまでのところ、このような観点に立った調査研究は非常に少なく、特に海水中の重金属汚染については、超微量重金属の分析方法が十分に確立していなかったこともあり、過去のデータには信頼のおけるものが少なく、海水汚染の推移を定量的に把握することはすこぶる困難である。一方、内湾域における海底堆積物の重金属汚染については、比較的多数の調査研究がこれまでに行われており、東京湾についても一都三県公害防止協議

---

\* 海象課海洋汚染調査室 Marine pollution research laboratory, Oceanographic Division

\*\* 海図課 Chart Division

会 (1972, 1973), 建設省 (1973), 千葉県水質保全研究所 (1979), 海上保安庁水路部 (1975, 1976, 1977, 1978, 1979, 1980) の報告書及び堀部 (1972), 坪田 (1973), 坪田・児玉 (1973), 坪田・関 (1973) らの報告等, 多くの調査結果をみることができる。しかし, その大部分は表層堆積物の汚染の現況調査に関するものであり, 汚染状態の推移を明らかにするような調査研究については, これまたほとんどみることがない。

最近になって, 松本・横田 (1977, 1978 a, b, 1979) により, 東京湾と大阪湾の海底堆積物の堆積速度及び海底堆積物中の重金属等の鉛直分布に関する研究が行われ, その結果, 単位面積当たりの重金属の人為的堆積量として, 堆積物中の重金属汚染の推移を定量的に把握する一方法が報告された。沿岸海域の海底堆積物には海洋環境に負荷された重金属のかなりの部分が沈積しており, もし, 浚渫・投棄・波浪による堆積物の攪乱, 海潮流による堆積物の再移動, ベントスによる混合・攪拌等の堆積層の乱れがなければ, 堆積物中には重金属濃度の鉛直分布の形で過去の汚染の歴史が記録されているはずである。したがって, 海底堆積物の堆積速度が与えられれば堆積物中の鉛直分布を明らかにすることにより, 過去の汚染状態の推移を年代的に推測することが可能であろうと考える。

われわれは松本らの方法をもとにして, 堆積物の重金属汚染の推移を概観するとともに, 東京湾全域の単位面積当たりの重金属の人為的堆積量を求め, これらの値から湾内全域に人為的に堆積した重金属の総量を推算したので, その結果を報告する。

## 2. 試料及び分析方法

### 2.1 試料採取

試料の採取は, 昭和53年11月, 水路部の測量船「拓洋」により行い, 26点の表層堆積物試料及び9点の柱状堆積物試料を採取した。試料採取点を Figure 1. に示した。表層堆積物の採取にはスミスマッキンタイヤ採泥器を使用し, 堆積物の表層 0~1 cm を分析用試料とした。また, 柱状堆積物試料の採取には内径 9.5 cm のプラスチック内管付の重力式柱状採泥器を用い, 採取後, 直ちに所定の各層で 1 cm の厚さに切断し, 分析用試料とした。

### 2.2 分析方法

堆積物試料は含水量を求めたあと, 110°C で乾燥し, 振動ボールミル (タングステンカーバイド製ポット) により 0.05 mm 以下に粉碎した。これをアルミリング法により 30 ton/cm<sup>2</sup> の圧力で加圧成形し, 分析用試料とした。重金属の定量は蛍光 X 線分析装置 (理学電機工業製, Geigerflex 3064) を用い, クロム・鉛・銅・亜鉛・ニッケルについて分析を行った。堆積物試料の組成の違いに基づくマトリックス効果の補正は, バックグラウンド・ピーク比を用いた検量線法により行った。バックグラウンド・ピーク比は, 重金属の蛍光 X 線ピークと, その近傍のバックグラウンド蛍光 X 線が同じマトリックス効果を受けるものと考え, その影響を補正するために用いられる値であり, 次式で示される。

$$\text{バックグラウンド・ピーク比} = \frac{\text{ピーク蛍光 X 線強度} - \text{バックグラウンド蛍光 X 線強度}}{\text{バックグラウンド蛍光 X 線強度}}$$

検量線作成のために用いた堆積物中の重金属濃度は, 堆積物の鉱物組成が大きく異なる数試料について標準添加法により求めた。今回分析した重金属濃度範囲では, 検量線は各重金属ごとにそれぞれ1本の直線で表わされた。

## 3. 結果及び考察

### 3.1 重金属濃度の水平分布

堆積物の表層 0~1 cm における重金属濃度の水平分布を Figure 2 (a~e) に示した。いずれの重金属につい

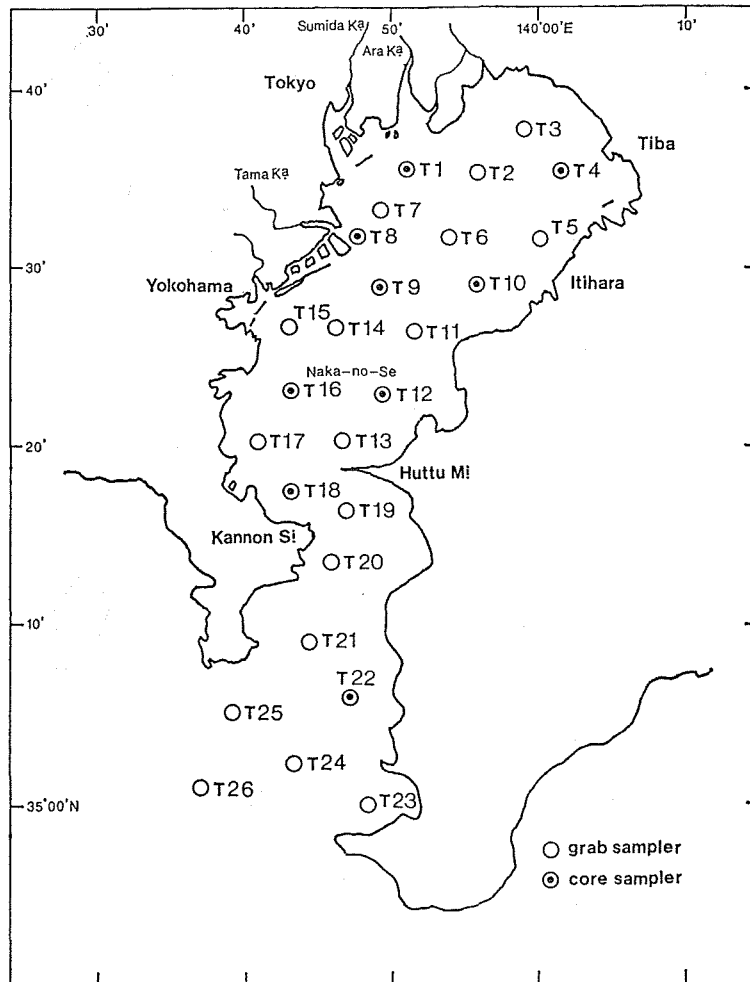


Figure 1 Sampling stations in Tokyo Bay

ても隅田川河口沖から湾中央及び市原沖にかけて高い値がみられるが、中ノ瀬以南では概して低い値がみられた。この傾向は海洋汚染調査報告第6号（海上保安庁水路部, 1980）に報告された昭和53年調査結果における脂肪族炭化水素, PCB, 水銀, カドミウムの分布と同様であった。

### 3.2 重金属濃度の鉛直分布

堆積物中の重金属濃度の鉛直分布を Table 1 及び Figure 3 (a~i) に示した。湾奥部荒川沖の T1 では表面から 15~16 cm の層に重金属濃度の極大があり、表層では濃度の減少傾向がみられる。一方、千葉県よりの T4 及び T10 では表層ほど重金属濃度が高い。重金属の鉛直分布とその堆積年代を対応づけるためには、堆積物の堆積速度を知る必要があるが、東京湾における堆積速度は松本・横田 (1979) により、湾奥・湾中央部で 0.76 cm/年という値が報告されている。川崎沖の T9 は松本らが報告した地点の近傍であるが、この 0.76 cm/年という堆積速度をあてはめてみると、表層から 5~6 cm にみられる重金属濃度の極大は 1970~1971 年に相当し、表層における重金属濃度の減少は最近になって汚染の負荷が軽減傾向にあることを示している。また、表層から 20~30 cm 以下では重金属濃度が一定になっているが、これは重金属による人為的汚染の進行が 1950 年ごろから始

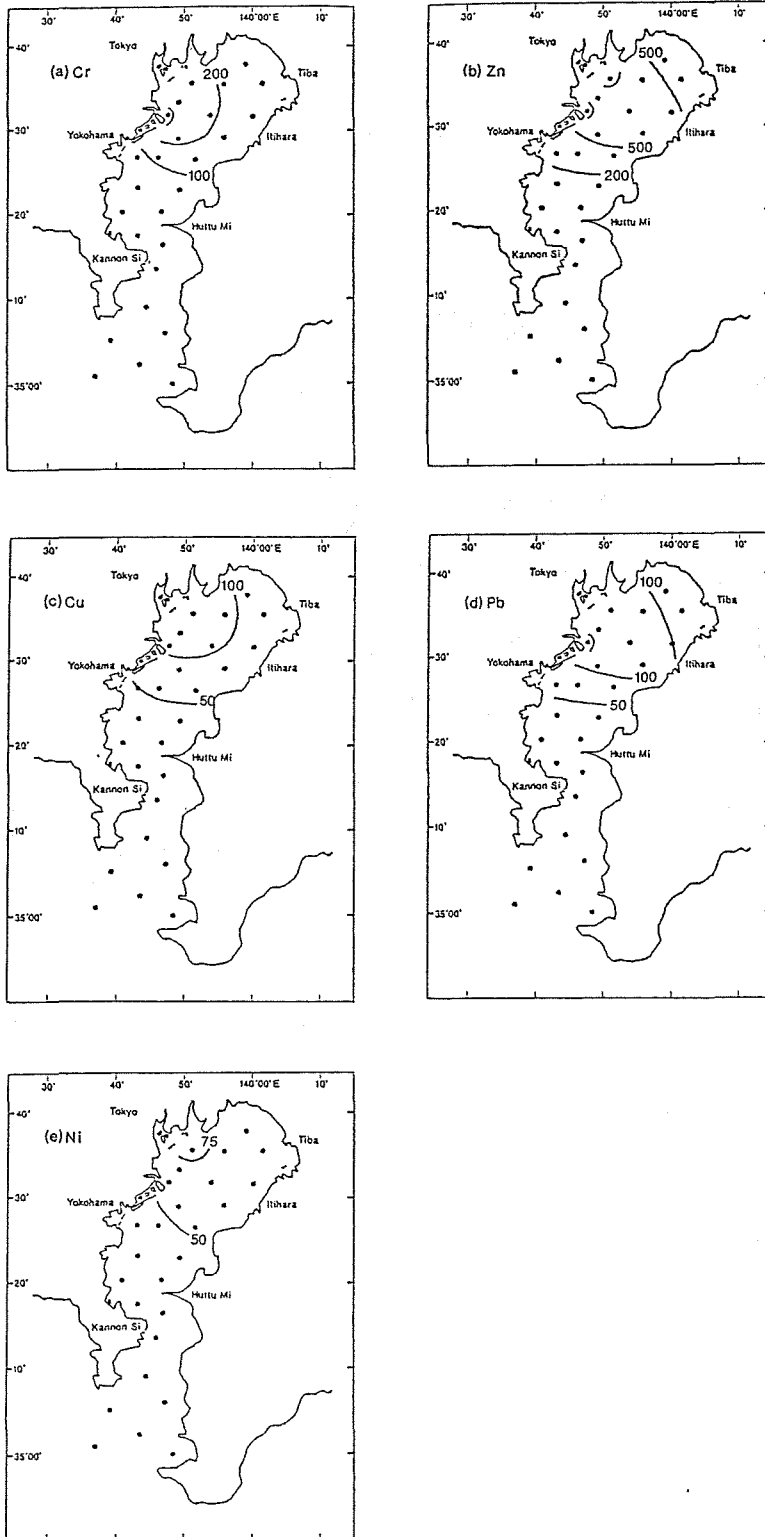


Figure 2 (a-e) Distribution of heavy metals in the surface sediment (ppm)

まっていることを示している。中ノ瀬以南の測点では鉛直分布がほぼ一定であり、人為的な重金属汚染は最近においてもほとんど進行していないと考えられる。

Table 1 Concentrations of heavy metals in the sediment of Tokyo Bay

station	depth	chromium	zinc	copper	lead	nickel
No.	(cm)	(ppm)	(ppm)	(ppm)	(ppm)	(ppm)
T 1	0- 1	223	486	153	141	76
	5- 6	250	466	177	167	105
	10-11	221	564	148	128	73
	15-16	415	853	221	212	75
	20-21	215	542	139	144	66
	30-31	115	253	75	92	67
	40-41	99	156	67	61	62
	50-51	94	117	62	51	66
	60-61	87	96	53	53	59
T 2	0- 1	193	683	115	134	69
T 3	0- 1	110	394	81	87	65
T 4	0- 1	111	460	74	92	60
	5- 6	88	249	63	68	53
	10-11	79	119	48	44	50
	15-16	76	99	46	43	50
	20-21	78	88	44	44	49
	30-31	75	86	45	35	51
	40-41	85	89	51	38	56
T 5	0- 1	135	582	78	102	62
T 6	0- 1	202	698	104	140	65
T 7	0- 1	210	610	123	149	62
T 8	0- 1	129	293	114	79	60
	5- 6	159	372	160	93	70
	10-11	115	273	93	67	57
	15-16	189	426	173	107	66
	20-21	388	896	236	202	78
	30-31	101	217	47	74	45
	40-41	204	544	177	178	54
	50-51	67	122	51	52	38
	60-61	80	193	71	76	48
T 9	0- 1	238	633	84	129	55
	5- 6	3224	611	82	195	76
	10-11	87	269	58	88	46
	15-16	77	177	51	55	46
	20-21	75	131	42	44	46
	30-31	81	90	36	33	46
	40-41	70	89	35	28	47
	50-51	73	89	40	33	48
T 10	0- 1	141	597	78	106	58
	5- 6	100	404	61	87	53
	10-11	71	197	47	55	48
	15-16	68	125	42	40	47
	20-21	69	98	34	34	44
	30-31	69	87	39	35	45
	40-41	70	91	50	29	44

Table 1 (continued)

station No.	depth (cm)	chromium (ppm)	zinc (ppm)	copper (ppm)	lead (ppm)	nickel (ppm)
T 11	0- 1	116	478	65	89	54
T 12	0- 1	52	114	21	27	28
	5- 6	62	114	22	32	32
	10-11	49	77	19	27	28
	15-16	52	64	18	23	28
	20-21	57	55	18	19	26
	30-31	57	55	18	19	26
T 13	0- 1	52	113	19	26	28
T 14	0- 1	109	389	65	86	47
T 15	0- 1	87	249	49	62	44
T 16	0- 1	56	100	19	25	28
	5- 6	69	175	37	44	35
	10-11	59	99	35	31	34
	15-16	60	78	32	25	32
	20-21	57	77	32	28	32
	25-26	53	72	29	26	33
T 17	0- 1	46	120	34	28	31
T 18	0- 1	62	137	26	37	30
	5- 6	65	162	28	42	31
	10-11	74	135	25	41	31
	15-16	56	107	24	37	30
	20-21	51	89	25	32	27
	25-26	51	75	24	30	28
	30-31	52	67	21	27	26
T 19	0- 1	67	97	40	30	22
T 20	0- 1	38	95	22	52	31
T 21	0- 1	71	119	53	57	38
T 22	0- 1	63	88	39	40	43
	5- 6	64	89	33	22	41
	10-11	61	87	34	23	42
	15-16	60	90	36	22	38
	20-21	62	85	34	21	41
	30-31	61	86	34	21	39
	40-41	60	84	33	22	39
	50-51	62	89	30	24	40
T 23	0- 1	57	100	36	28	37
T 24	0- 1	74	100	41	33	37
T 25	0- 1	54	92	33	28	30
T 26	0- 5	64	98	48	36	40

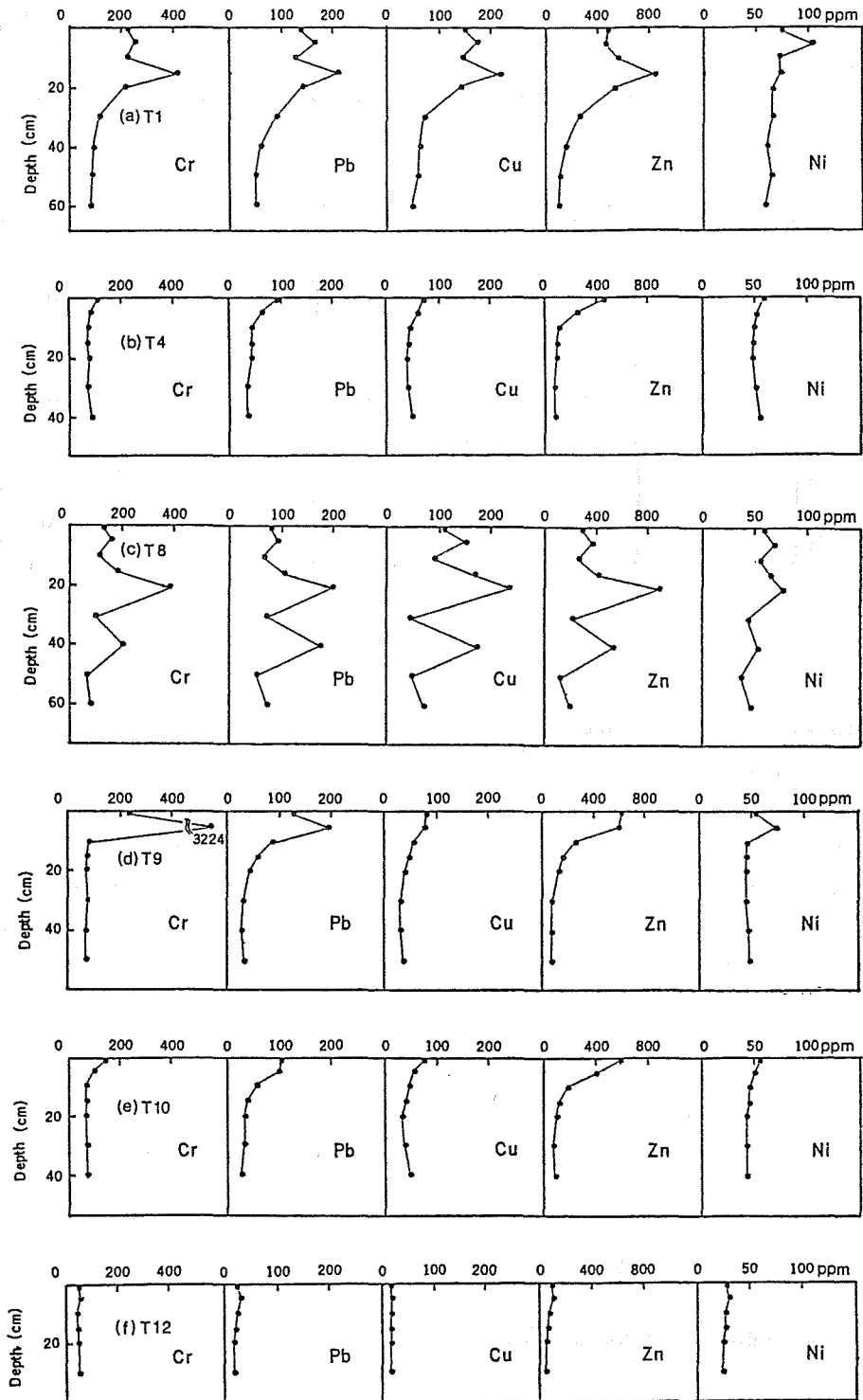


Figure 3(a~i) Vertical distribution of heavy metals in the sediment cores

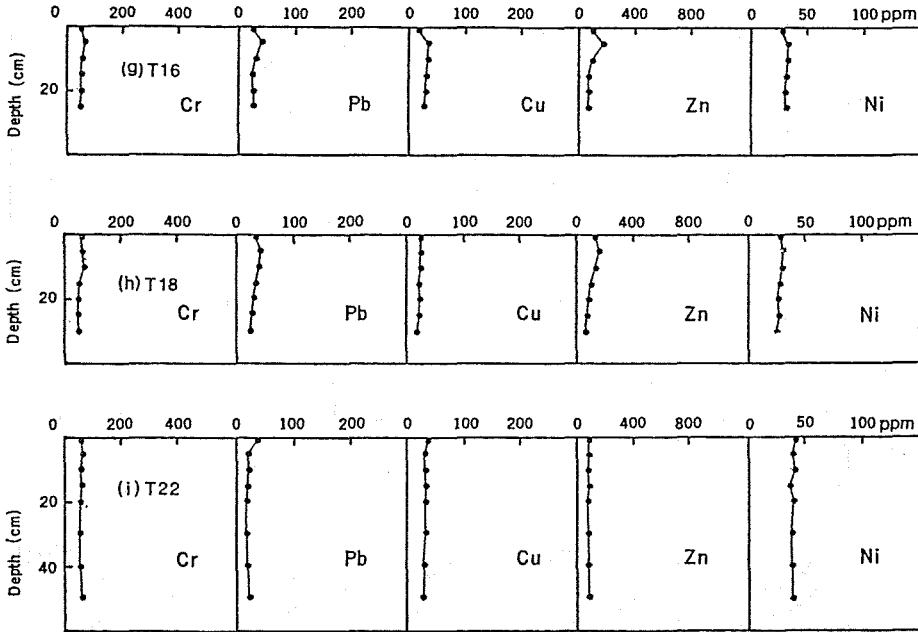


Figure 3 (continued)

3.3 重金属のバックグラウンド濃度

各測点の重金属濃度の鉛直分布は、いずれもある深さより下方でほぼ一定値をとるようになる。前項でも述べたように、この一定値は堆積速度から考えて人為的汚染が始まる以前の濃度、すなわち、バックグラウンド濃度を示すものと考えられる。バックグラウンド濃度は各測点ごとに若干の差がみられるが、これは堆積物の粒度組成あるいは鉱物組成の違い、すなわち、堆積物を構成する成分が砂質・粘土質あるいは貝がら質のいずれであるかという点に関係するものと考えられる。そこで、各測点の測定結果を泥質堆積物と砂質堆積物に大別して、それぞれのバックグラウンド濃度を比較してみると、Table 2 のようになり整然とした関係が認められた。

Table 2 Background concentration of heavy metals in the sediment of Tokyo Bay

heavy metal	background concentration (ppm)	
	mud	sand
chromium	70-100	50-55
zinc	90-120	55-75
copper	40- 60	20-30
lead	35- 60	20-30
nickel	45- 60	25-35

3.4 重金属の単位面積当たりの人為的堆積量

ある測点について、過去にさかのぼって重金属汚染状況を表わす一つの指標として単位面積当たりの人為的堆積量  $P$  ( $\mu\text{g}/\text{cm}^2$ ) があり、次式によって与えられる。(松本・横田 1978 a)

$$P = \int_0^{\infty} (C - C_{\infty}) \rho_s (1 - \phi) dZ$$



ここで、 $C$  は堆積物中の重金属濃度 (ppm),  $C_0$  はバックグラウンド濃度 (ppm),  $\rho_s$  は堆積物粒子の密度 ( $\text{g/cm}^3$ ),  $\phi$  は堆積物の現場における間隙率,  $Z$  は深さ (cm) である. この値は, バックグラウンド濃度を超えて負荷された重金属について, これを鉛直方向に積算したものである. この  $P$  値を今回の調査結果によって各測点ごとに求めてみると Table 3 に示すような結果を得た. また, 得られた  $P$  値を水平分布として表わせば Figure

Table 3 Artificial accumulation of heavy metals in the sediment of Tokyo Bay

station No.	artificial accumulation ( $\mu\text{g/cm}^2$ )				
	chromium	zinc	copper	lead	nickel
T 1	2000	6600	1300	1400	140
T 4	70	890	80	190	30
T 8	2900	8600	2500	1700	250
T 9	—	1900	220	590	60
T 10	130	1300	100	210	40
T 12	70	310	50	170	40
T 16	140	830	110	130	30
T 18	250	1300	40	240	70
T 22	30	100	50	70	40

4 (a~e) のようになる. これらの結果によれば, 人為的堆積量としてクロム 30~2,900  $\mu\text{g/cm}^2$ , 亜鉛 100~8,600  $\mu\text{g/cm}^2$ , 銅 40~2,500  $\mu\text{g/cm}^2$ , 鉛 70~1,700  $\mu\text{g/cm}^2$ , ニッケル 30~250  $\mu\text{g/cm}^2$  のような堆積量分布があることがわかる. また, ニッケルは多摩川河口沖及び隅田川河口沖付近でやや高い値がみられるほかは, 全般に非常に低い値であるのに対し, その他の重金属については, 表層堆積物中の重金属濃度の水平分布と同様に, 隅田川河口沖から湾奥部及び市原沖にかけて高い値で存在しているようである. なお, 中ノ瀬以南では人為的な堆積はほとんど現われていない.

### 3.5 重金属の人為的総堆積量

半谷・相沢 (1973) は, 水俣湾の海底堆積物中に蓄積した水銀の総量を求めるために, 単純平均法, ティーセン法, 等水銀量線法の各方法について検討し, 等水銀量線法で求めた総量がより適当であると報告している. この方法は, 対象となる地域の測定値をもとにして等水銀量線を引き, それぞれの線で囲まれた面積にその地域における平均水銀量を乗じて総量を計算する方法である. そこで今, この等水銀量線のかわりに Figure 4 (a~e) に示した単位面積当たりの人為的堆積量の等値線を使って同様の計算を行えば, 東京湾の海底堆積物中の重金属の人為的総堆積量を求めることができよう. このようにして, 富津崎と観音崎を結ぶ線から北の湾内に人為的に堆積した重金属の総量を計算した結果を Table 4 に示した. すなわち, 亜鉛の堆積量が 21,000 トンと最も多く, クロム・鉛・銅は一桁下がったところで並んでおり, ニッケルは 600 トンと更に一桁下がった堆積量が求められている.

Table 4 Total artificial accumulation of heavy metals in the sediment of Tokyo Bay

heavy metal	total artificial accumulation (ton)
chromium	5300
zinc	21000
copper	3400
lead	4500
nickel	600

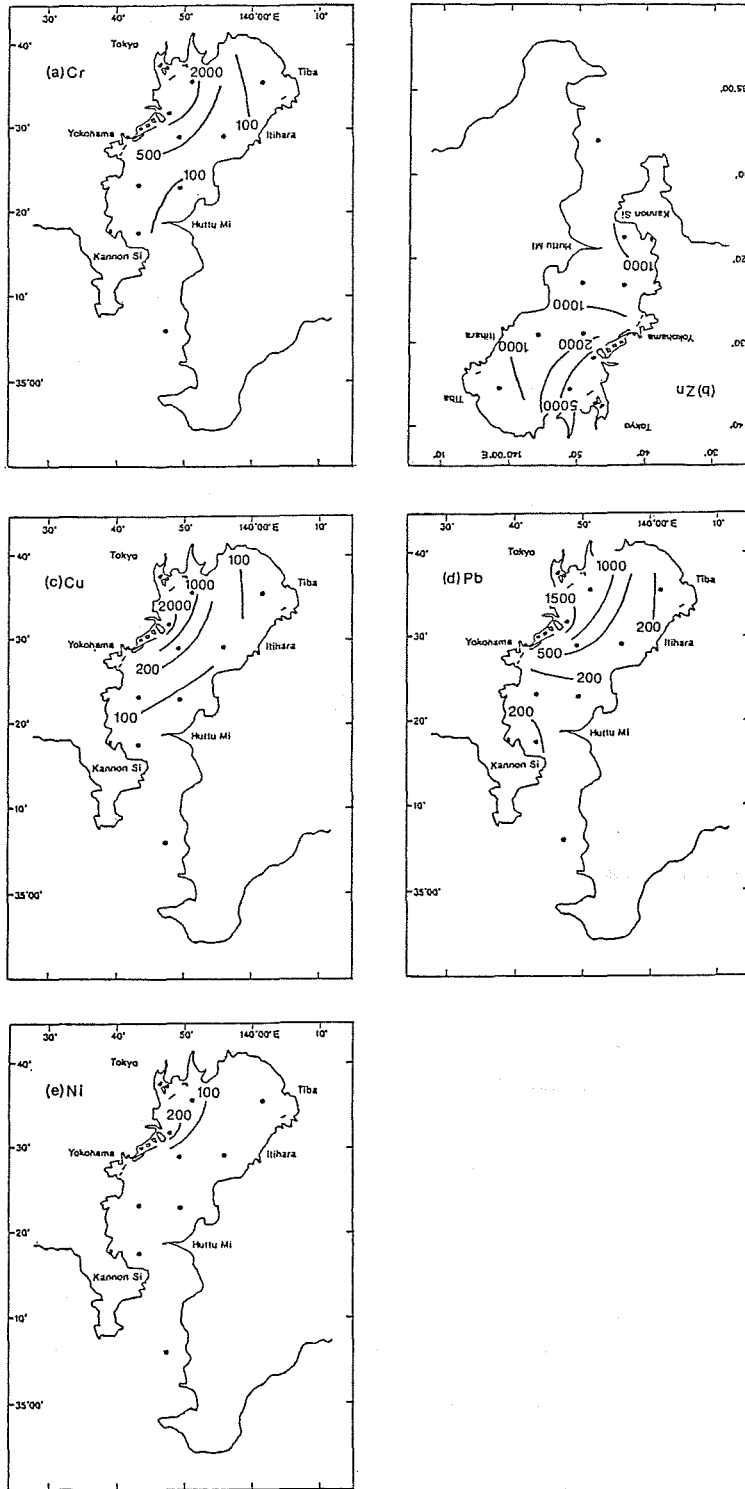


Figure 4 (a~e) Distribution of artificial accumulation of heavy metals in the sediment ( $\mu\text{g}/\text{cm}^2$ )

#### 4. おわりに

東京湾に負荷された重金属量については、計算の基礎となる信頼できるデータが少なかつたため、これまで明らかにされていない。したがって、総堆積量研究の一方法を示した本研究では、算出した重金属の人為的総堆積量と負荷量との関係について議論するまでに至っていないが、最近になって、河川水及び海水中の重金属濃度について信頼できる値が蓄積されはじめており、総堆積量に関する研究を一定期間をおいて繰り返すことにより、負荷量と海底堆積物中への沈積量に関する物質収支の一面を明らかにすることも今後は可能となるであろう。ただし、重金属の人為的堆積量の環境に及ぼす影響、すなわち、海底堆積物中に沈積した重金属の有害性等については、堆積物と海水の間における重金属の沈澱・溶出サイクル等の更に専門的な研究を待つ必要であることは言うまでもない。

また、本研究では重金属濃度の鉛直分布について、松本・横田(1978)の堆積速度に関する研究結果から判断して、堆積層の乱れがないものと仮定して考察を行ってきたが、われわれが調査を行ったすべての測点について堆積速度及び堆積層の乱れが明らかにされているわけではない。したがって、今後は、堆積速度に関する研究をあわせて行い、東京湾以外にも、伊勢湾・大阪湾等についても同様にして重金属の人為的総堆積量を求め、各湾の汚染状態について比較・検討を行いたいと考えている。

最後に、試料採取に従事した測量船「拓洋」の船長ほか乗組員の方々及びこの小論を草するに当たって終始支援下さり、いろいろ教示下さった杉本喜一郎海洋汚染調査室長、菱田昌孝主任海象調査官、柴山信行海象調査官に深く感謝する。

#### 参 考 文 献

- 千葉県水質保全研究所 1979: 公共用水域底質調査報告書, 水保研資料, 16.
- 半谷高久, 相沢孝子 1973: 水俣湾における水銀の蓄積, 半谷高久編 汚染水質機構, 共立出版, 東京, 92-117
- 堀部純男編 1972: 文部省特定研究 I, 東京湾の汚染物質の生物地球化学的研究
- 一部三県公害防止協議会 1972: 昭和 46 年度東京湾総合調査報告書
- 一部三県公害防止協議会 1973: 昭和 47 年度水質汚濁共同調査報告書 (東京湾総合調査)
- 海上保安庁水路部 1975: 海洋汚染調査報告, 昭和 47・48 年調査結果
- 海上保安庁水路部 1976: 海洋汚染調査報告, 昭和 49 年調査結果
- 海上保安庁水路部 1977: 海洋汚染調査報告 (第 3 号), 昭和 50 年調査結果
- 海上保安庁水路部 1978: 海洋汚染調査報告 (第 4 号), 昭和 51 年調査結果
- 海上保安庁水路部 1979: 海洋汚染調査報告 (第 5 号), 昭和 52 年調査結果
- 海上保安庁水路部 1980: 海洋汚染調査報告 (第 6 号), 昭和 53 年調査結果
- 建設省 1973: 東京湾汚濁調査報告書
- 松本英二, 横田節哉 1977: 底泥からみた東京湾の汚染の歴史, 地球化学, 11, 51-59.
- 松本英二, 横田節哉 1978 a: 大阪湾底泥の堆積速度と重金属汚染, 日本海洋学会誌, 34, 108-115.
- 松本英二, 横田節哉 1978 b: 東京湾底泥の堆積速度と汚染, 日本海洋学会秋季大会講演要旨集, 177.
- 松本英二 1979: 底泥からみた沿岸海域汚染の変遷, 地質ニュース, 293, 27-33.
- 坪田博行編 1973: 文部省特定研究 I, 東京湾の汚染物質の生物地球化学的研究
- 坪田博行, 児玉幸雄 1973: 東京湾の化学的研究の概観, 沿岸海洋研究ノート, 11, 61-70.
- 坪田博行, 関文威 1973: 東京湾の汚染物質の生物地球化学的研究, 沿岸海洋研究ノート, 11, 13-22.