

東京都の運河部・内湾部における底質の長期変動傾向の解析

安藤 晴夫

要 旨

東京都の底質調査結果を用いて都内の運河および内湾における底質汚染の現状と 1970 年代から今日までの変動傾向について検討した。トレンド解析には、底質データの変動特性を考慮してノンパラメトリック手法である Mann-Kendall 法を使用した。解析結果によれば、底層水の貧酸素化に関連する強熱減量や COD 等の項目のトレンドは地点により異なり、水域全体では明確な改善傾向は認められず、多くの地点では、依然として高い有機物濃度を示している。一方、重金属等の有害化学物質のうち、カドミウム、鉛、総水銀、PCB の濃度は、水域全体で低下傾向を示したのに対し、ヒ素と総クロムの濃度は、低下傾向の地点はなく、むしろ上昇傾向を示す地点が存在した。

キーワード：東京湾、底質、長期変動、貧酸素化

Long-term changes in bottom sediment pollution of canals and coastal sea areas in Tokyo

ANDO Haruo

Summary

Using sediment quality data monitored since 1972 by the TMG, the present state and long-term trend of sediment pollution in the canals and the coastal sea of Tokyo, were analyzed. Considering the sample size and variation of sediment data, Mann-Kendall method which is a nonparametric method, was used for the trend analysis. The following results were obtained; Trends of ignition loss, COD, T-S and ORP., which are related to the organic pollution and the occurrence of hypoxic bottom water, indicated that the state of organic pollution has not been improved throughout the water area and the bottom sediment of many stations still contains a high level of organic matters. As for the toxic chemicals like heavy metals, the contents of cadmium, lead, total mercury and PCB in bottom sediments have been decreasing significantly at almost all stations, but arsenic and total chromium contents have been increasing at some stations.

Key Words: Tokyo Bay, sediment quality, long-term trend, hypoxia

いられ、採取された表層泥について、各種項目（2006年度は23項目）が測定、分析されている。調査項目のうち、全シアン、アルキル水銀等、測定結果の大部分が定量下限値以下の項目については、解析対象から除いた。また調査開始年度が遅く測定期間が短い全窒素（T-N）、全りん（T-P）、りん酸性りん（PO₄-P）については、トレンド解析は行わなかった。

(2) データ解析方法

運河や内湾の底質は、海底の凹凸や流況などの影響を強く受けるため、場所によるデータの変化が大きい⁷⁾。また、使用できるデータは各地点について年1個であり、その分布に正規性を仮定することは困難である。こうした理由から、トレンド解析には分布を仮定しないノンパラメトリックな統計手法であるマン・ケンダール法(Mann-Kendall)⁸⁾を用いた。これは、データの大小関係や順序関係に基づいてトレンドを推定する方法で、具体的には、値の正・負によって解析対象の時系列データが上昇傾向か下降傾向かを示す統計量 τ を計算し、 p 値によって、その統計量の有意性を判断する。ここでは、有意水準を $p<0.01$ 、 $p<0.05$ の2段階にレベル分けして結果を表した。

3 結果と考察

3.1 底質汚染の現状

図2に示す1997～2006年の項目別、地点別の底質データの分布から、近年の底質汚染状況の特徴を検討した。

(1) 有機汚濁関連項目

強熱減量(IL)からT-Pまでの6項目は、有機汚濁に関連する項目である。これらのうち、強熱減量とCOD、T-N、T-Pは、底泥中の有機物濃度に関連し、酸化還元電位(ORP)と全硫化物(T-S)は、底泥が暴露されていた底層水の貧酸素化の程度に関連すると考えられる。

強熱減量、COD、T-Nは、地点間の濃度の大小

関係が、相互によく類似し、内湾沖合のB22やB35で濃度が高く、C15やB23で低い傾向が認められる。河川から湾内に流入した懸濁物は、沖合まで移送される過程で粒径や比重が大きい成分から先に沈降し、沖合では有機物濃度の高い成分が沈降しやすいためと考えられる⁹⁾。また、都内湾では、河口域より沖合の方が底泥中のクロロフィル濃度が高いことから¹⁰⁾、赤潮プランクトンの沈降量も多いことが推測される。これらの要因により、B22やB35では、底泥中の有機物濃度が高くなっていると考えられる。一方、下水処理水の影響を強く受けるB23では、海水中のCODや栄養塩濃度は都内湾では最も高いが⁶⁾、周辺の流況により比重の小さい有機懸濁物は堆積し難いことと、水深が浅く貧酸素化が起こり難いために底生生物が豊富²⁾で、生物浄化作用も大きいことなどが、底泥中の有機物濃度が低い原因と考えられる。C15については、周辺に流入汚濁源がないことが原因と考えられるが、流況等、他の要因については明らかでない。

T-Pは、運河部のC02、C18、C24、内湾部のB08で濃度が高い。運河部の地点については、下水処理水の影響が原因の一つと考えられる。一方、B08周辺では、河川水が海水と混合する過程で懸濁粒子表面の電荷が失われて凝集しやすくなり、それにりんが吸着されて沈降・堆積するためT-P濃度が高くなると考えられる。

ORPは、値が低いほど底質が悪化して還元的な状況（貧酸素化し、硫化水素やメタンなどが発生しやすい状況）にあることを示すが、運河部のC15、C24や、内湾部でも水深が浅いB08、B23では、他の地点に比べてORPが高いことから、貧酸素化し難いことを示している。

T-Sは、ORPが低く還元的な地点で高い傾向が認められ、内湾部に比べて運河部の地点の方が全体的に濃度が高めの傾向を示している。

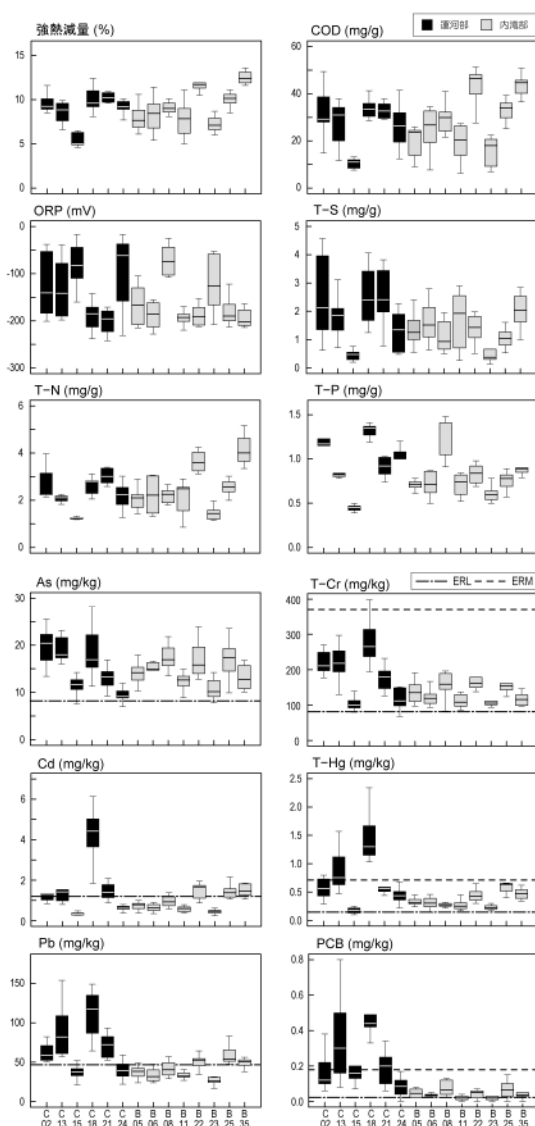


図2 底質項目別の地点間濃度比較
(集計期間：1997～2006年)

(2) 重金属等の項目

運河や内湾における底質中の重金属や PCB は、大気粉塵や工場・事業所排水に含まれていたものが、主に下水処理場や余水吐を経由して流入し、堆積したものと考えられる。実際、道路脇粉塵中の重金属濃度の調査結果によれば、自然界の値に比べて鉛(Pb)の濃度は約 33 倍、クロム(Cr)は約 11 倍、カドミウム(Cd)は約 6 倍高かったことが報告されている¹¹⁾。

図2の各底質項目について地点間で比較すると、下水道の影響を受け易い運河部で濃度が高い傾向

が認められる。

特に運河部の C18 では、ヒ素(As)から PCB まですべての項目の濃度が他の地点に比べて高く、Cd でその傾向が著しく、下水処理水等周辺からの人為的影響を強く受けていることを示している。一方、C15 では、多くの項目で濃度が低く、そうした影響が少ないことを示唆している。

As については、他の項目と異なり、運河部と内湾部の地点の濃度差が他の元素に比べて小さい。その理由は、水環境中での存在形態の違いに起因すると考えられる。すなわち、Pb 等の重金属の場合、水環境中では主に懸濁態で存在するのに対して、As では溶存態で存在することが報告されている¹²⁾。

(3) 底質汚染状況の評価

ア) 有機汚濁関連項目

水産用水基準 (2005 年版)¹³⁾では、水中の溶存酸素との関係から、底質の基準値として COD (アルカリ法) が 20mg/g 乾泥以下、T-S が 0.2mg/g 乾泥以下と定められている。この値と比較すると、大部分の地点では底質の COD と T-S の値が、これらの値を超過しており、底質の有機汚濁状況が底層水中の酸素を消費して底生生物の生息に悪影響を与えるレベルにあることを示している。また、7 都県市の水質改善対策専門部会がまとめた底質評価方法¹⁴⁾では、底質の有機汚濁状況を、強熱減量の値によって、15%以上、15～10%、10～5%、5～2%、2%未満の 5 段階に区分しているが、大部分の地点の強熱減量の値は、5～15%の範囲にあり、有機汚濁が進行していて、底質改善が必要な状況にあることを示している。

イ) 重金属等の項目

重金属や PCB による汚染は、底生生物の生息に悪影響を与えることが予想されるが、実際の環境中では有機物濃度が高く貧酸素化を引き起こしやすい底質ほど有害物質の濃度も高い傾向があり、

表1 米国 NS&T Programによる底質指針値¹⁵⁾

物質名	ERL	ERM
As	8.2	70
Cd	1.2	9.6
Cr	81	370
Cu	34	270
Pb	46.7	218
Hg	0.15	0.71
Ni	20.9	51.6
Ag	1.0	3.7
Zn	150	410
T-PCBs	0.0227	0.18

単位：ppm (乾燥重量当り)

単一の有害物質の濃度と底生生物の生息状況との関係を明らかにすることは難しい。米国大気海洋庁 (NOAA) は、National Status and Trends Program (環境の現状と動向の評価に関する国家プログラム) で、過去に実施された各種の調査結果から有害物質濃度と底生生物の生息状況との関係を統計的に解析して、非公式ながら底質の指針値 (Sediment Quality Guideline) として公表している¹⁵⁾。実際には、前述のような問題点や、日米での生物種の違いなどもあり、日本の底質への適用の可否については議論がある。一方、日本でもこの方法を参考にして、日本の港湾におけるデータを用いて同様な方法での検討が行われ、NOAAの指針値とほぼ等しい結果を報告している¹⁶⁾。ここでは参考として表1にNOAAの指針値を示した。表中の ERL (Effects Range-Low)は、それ以下では底生生物への悪影響がほとんど認められない濃度、ERM (Effects Range-Median)は、その以上で

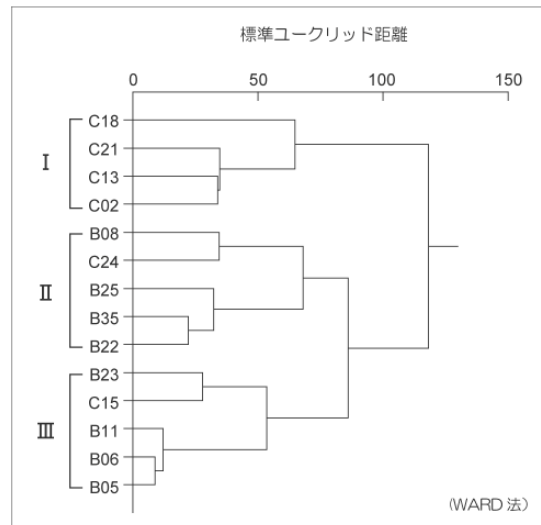


図3 底質調査地点のクラスター分類結果

は、悪影響が頻繁に現れる濃度と記されている。図2には、ERLとERMの濃度を、それぞれ一点鎖線と破線で表した。これらの値と比較すると、T-Hg、PCB濃度については、ERMの値を超える地点がいくつか認められる。

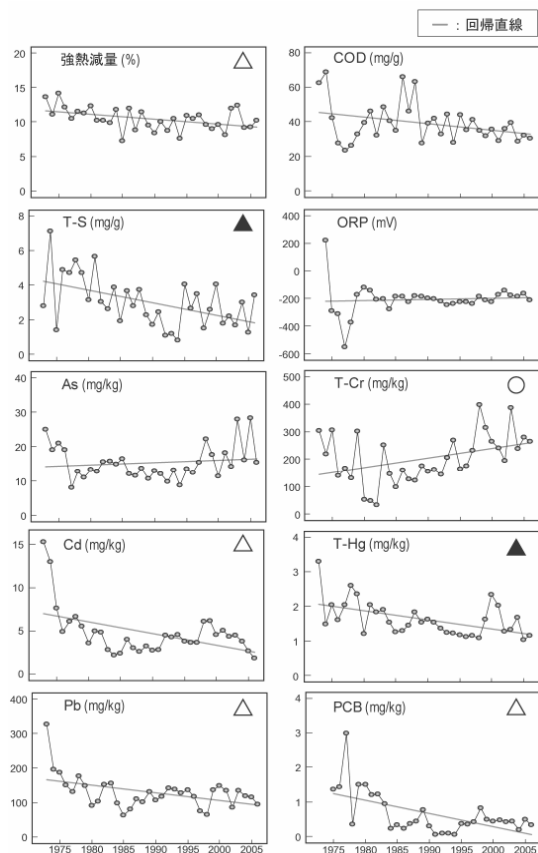
(4) 底質による地点分類

表2は、1997～2006年の底質の平均値を地点別、項目別に示したもので、これを用いてクラスター分析 (標準ユークリッド距離、Ward法) により地点分類を行った。図3は、クラスター分析で得られたデンドログラムである。運河部で、特に底質中の汚染物質濃度が高い地点がI群に、逆に多くの項目の濃度が相対的に低い地点がIII群に、その中間的な値の地点がII群に分類された。

表2 1997～2006年の東京都運河部・内湾における各調査地点の底質平均値

地点	IL (%)	COD (mg/g)	T-N (mg/g)	T-P (mg/g)	PO4-P (mg/g)	T-S (mg/g)	ORP (mV)	n-Hex (mg/g)	pH	AS (mg/kg)	T-Cr (mg/kg)	Cd (mg/kg)	T-Hg (mg/kg)	Pb (mg/kg)	PCB (mg/kg)
C02	9.3	31.5	2.77	1.21	0.81	2.37	-127	4.3	7.7	19.6	242	1.43	0.58	61.9	0.16
C13	8.6	27.1	2.07	0.82	0.56	1.77	-131	4.0	7.9	18.8	222	1.54	0.87	88.5	0.34
C15	5.4	10.5	1.21	0.45	0.27	0.49	-83	1.1	8.0	11.4	108	0.36	0.18	36.7	0.21
C18	10.0	33.9	2.72	1.32	0.93	2.50	-191	5.8	7.9	18.6	281	4.26	1.47	111.1	0.45
C21	9.9	31.6	3.01	0.91	0.57	2.45	-189	4.3	7.9	13.0	175	1.46	0.57	71.3	0.19
C24	9.1	26.3	2.33	1.03	0.68	1.53	-99	3.0	7.3	9.5	132	0.97	0.44	42.5	0.10
B05	7.9	20.6	2.11	0.71	0.43	1.44	-166	2.0	7.7	14.3	136	0.74	0.34	40.0	0.05
B06	8.2	24.3	2.20	0.71	0.40	1.59	-188	2.2	7.8	14.6	125	0.64	0.31	33.9	0.04
B08	9.1	29.1	2.22	1.25	0.88	1.07	-82	2.0	7.5	19.0	159	0.96	0.27	42.1	0.09
B11	7.8	19.5	2.11	0.72	0.40	1.70	-192	2.0	7.7	12.1	118	0.60	0.27	32.2	0.03
B22	11.9	42.9	3.65	0.83	0.38	1.40	-190	1.9	7.6	16.9	177	1.48	0.44	51.4	0.04
B23	7.3	16.0	1.43	0.60	0.36	0.63	-123	1.3	7.8	10.7	119	0.44	0.24	25.6	0.02
B25	10.3	32.2	2.54	0.75	0.38	1.06	-181	2.2	7.7	17.1	161	1.43	0.60	60.0	0.07
B35	12.6	42.9	4.10	0.91	0.43	2.02	-195	2.8	7.7	13.1	117	1.49	0.47	48.3	0.04

3. 2 底質汚染状況の長期的変遷



上昇・下降傾向は Mann-Kendall 法による検定結果 (記号の意味は表 3 参照)

図 4 港南大橋 (C18) における底質の経年変化

図 4 に底質の長期変化の例として、14 地点のうちで重金属等の濃度が最も高い C18 の各底質項目の経年変化と回帰直線を示す。各グラフ右上の○、△の記号と色は、後述する表 3 のトレンド解析結果を示している。強熱減量は、比較的年々変動が小さいが、その他の項目では、変動が大きく、特に Cd や Pb、PCB は 1970 年代前半の変化が大きい。こうした特徴は他の地点の経年変化でも見られた。

表 3 は各地点、項目についての Mann-Kendall 法によるトレンド解析結果をまとめたもので、トレンドを示す統計量 τ により上昇傾向の項目は○、下降傾向の項目は△で表し、 τ の有意性を示す p 値に応じて色分けを行った。またトレンドの有意性が棄却 ($p > 0.05$) された項目については・で示した。

ORP については値が高いほど底質が良い状況を示すため、他の項目と逆に上昇傾向を△、下降傾向を○で表した。

(1) 有機汚濁関連項目

強熱減量と COD は、どちらも底質中の有機物濃度に関連する項目と考えられるが、一致して同じ傾向変動を示す地点は認められなかった。すなわち、強熱減量については、C18 と B25 で下降傾向、C21 と B08 で上昇傾向を示したが、これら 4 地点の COD については、有意なトレンドは認められず、逆に COD が下降傾向を示した B05 と B11 の強熱減量もトレンドが認められなかった。

ORP と T-S は、前述のように海底直上水の溶存酸素濃度を反映する項目であり、貧酸素化しやすい状況が改善傾向にあれば、ORP は上昇傾向を、TS は下降傾向を示すと考えられる。表 3 によれば、ORP は、5 地点で上昇傾向 (改善傾向) が認められたが、TS では、C13 と C18 でのみ下降傾向を示した。

これらの結果から、底質の有機物濃度で見限り、この海域における底質の有機汚濁状況は地点間で変動傾向が異なり、水域全体では、明確な改善傾向が認められない。ただし、水域全体の改善状況の有無を的確に評価するためには、個々の地点の有機物濃度の変化ではなく、水域全体に堆積した有機物総量の変化を把握することが必要であると考えられる。

(2) 重金属等の項目の変動傾向

底質中の Cd、Pb、総水銀 (T-Hg) および PCB の濃度は、大部分の地点で経年的に下降傾向を示している。しかし、As と総クロム (T-Cr) の濃度は、前述の Pb 等と異なり、経年的な下降傾向は認められず、As は内湾部で、総クロムは、運河部を中心とする数地点で上昇傾向を示している。その原因についてはまだ不明で、今後さらに検討する必要がある。

表3 Mann-Kendall法による
各地点底質のトレンド解析結果

地点	IL	COD	T-S	ORP*	As	T-Cr	Cd	T-Hg	Pb	PCB
C02	●	●	●	△	●	○	●	▲	△	▲
C13	●	●	△	△	●	●	△	▲	●	▲
C15	●	●	●	▲	●	●	●	●	●	●
C18	△	●	▲	●	●	○	△	▲	△	△
C21	●	●	●	●	●	●	▲	▲	▲	▲
C24	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
B05	●	△	●	●	●	●	△	▲	▲	▲
B06	●	●	●	●	●	●	●	▲	▲	▲
B08	●	●	●	▲	●	●	▲	▲	▲	▲
B11	●	△	●	●	●	●	▲	▲	▲	▲
B22	●	●	●	●	○	●	△	▲	▲	▲
B23	●	●	●	△	●	○	●	▲	▲	▲
B25	△	●	●	●	●	●	▲	▲	▲	▲
B35	●	●	●	●	●	●	●	▲	▲	▲

上昇：● p < 0.01 / ○ p < 0.05, 下昇：▲ p < 0.01 / △ p < 0.05
ORP：▲ 上昇傾向 / ● 下降傾向

柱状試料による底質汚染状況の推移についての報告^{3,5)}によれば、東京湾における底質の重金属汚染は1900年頃に始まり、1950年頃から急激に濃度が上昇し、1970年頃にピークに達したが、それ以降は急速に濃度が減少している。Pbについては、東京湾への年間堆積量として、1880年が17t（非人為起源の値）の値が1970年に110tまで増加し、その後1980年には71tまで減少したと推定されている¹⁷⁾。またPCB濃度についても同様な傾向にあることが報告されている⁴⁾。したがって、東京都の運河部及び内湾部における今回の解析結果は、既存の報告結果とも良く一致している。また、1970年に健康項目として環境基準値が設定されたHg、Cd、Pb、Cr、As等の都内公共用水域において、分析検体中の基準超過検体の件数は、開始直後から急速に低下し、1980年以降にはPbとAsで散発的に超過検体が見られる以外は0%の状況が続いている⁶⁾。

4 おわりに

本研究の結果から、東京都の運河部、内湾部の底質について、次のことが明らかになった。

- (1) 底層水の貧酸素化の原因と考えられる底質の有機汚濁状況は、各地点の有機物濃度で見るとは、過去30年以上の期間で明確な改善傾向は認められない。ただし、水域全体の底質中の有機物総量の増減について、今後検討する必要がある。
- (2) 有害物質であるCd、T-Hg、PbやPCBの底質中の濃度は、水域全体で下降傾向にあることが明らかになった。
- (3) AsとT-Crは、他の重金属と異なり、濃度が上昇傾向を示す地点が認められた。地点間の濃度の大小関係に関しても、他の重金属と異なる傾向を示しており、水域への負荷量の増加の有無等についてさらに検討する必要があると考えられる。
- (4) 水質測定計画に基づいて1970年代から継続的に実施されてきた底質調査が、過去からの底質汚染状況を知る上で非常に有効であることが明らかになった。したがって今後ともこうした長期にわたる定期的な調査を継続していくことが重要であると考えられる。

引用文献

- 1) 安藤晴夫ら：1980年以降の東京湾の水質汚濁状況の変遷について—公共用水域水質測定データによる東京湾水質の長期変動解析—，東京都環境科学研究所年報，(2005)。
- 2) 安藤晴夫，川井利雄：東京都内湾における底生生物生息状況の解析結果について，東京都環境科学研究所年報，77-84 (2007)。
- 3) 松本英二ら：東京湾の人為的環境変化—地質時代の環境変化との比較，地質調査所月報，35(6)，243-260 (1984)。
- 4) 清水潤子ら：東京湾海底堆積物中におけるPOP（残留性有機汚染物質）濃度分布の特徴について（平成14年東京湾POP調査結果より），海洋情報部研究報告 第41号，pp.16 (2005)。

- 5) 本田照幸ら：過剰Pb-210法による海底堆積物の堆積年代測定について，ふいっしょんトラックニュースレター，13,39-41 (2000).
- 6) 東京都環境局：昭和47～平成19年度 都内河川・内湾の水質測定結果（資料編）．〈注：局名および資料名は途中で何度か変更〉
- 7) 一都三県公害防止協議会：4.2 底質調査結果，昭和48年度 水質汚濁共同調査報告書（東京湾総合調査）157-166(1974).
- 8) Gilbert, R. O. : 16.4 Mann-Kendall Test, Statistical methods for environmental pollution monitoring, ISBN 0-442-23050-8 (1987).
- 9) 安藤晴夫ら：洪水時の流入汚濁による東京湾水質への影響について，東京都環境科学研究所年報，(2005).
- 10) 東京都環境保全局：平成4年度 東京都内湾汚泥堆積状況調査解析委託報告書，(1993).
- 11) 浦瀬太郎ら：廃棄物処分場浸出水および道路脇粉塵に含まれる重金属の日本とフィリピンでの状況の比較，水環境学会誌，25(11)，657-660(2002).
- 12) 新矢将尚ら：人と重金属のかかわり，生活衛生，50(5)，261-267(2006).
- 13) ㈱日本水産資源保護協会：水産用水基準(2005版)，(2006).
- 14) 七都縣市首脳会議環境問題対策委員会水質改善対策専門部会：東京湾における底生生物調査指針および底生生物等による底質評価手法，全国公害研会誌，25(2)，55-61(2000).
- 15) 米国海洋大気庁(NOAA)：“Sediment Quality Guidelines developed for the National Status and Trends Program”，Sediment Quality Guidelines (ERL/ERM)，http://response.restoration.noaa.gov/bookshelf/121_sedi_qual_guide.pdf
- 16) 内藤了二ら：港湾域の底泥中化学物質濃度と底生生物叢の関係，港研資料 No.1174 (2008.6).
- 17) Hira0, Y. et al:“Lead isotope ratios in Tokyo Bay sediments and their implications in the lead consumption of Japanese industries”，Geochemical Journal, 20, 1-15 (1986).