

港湾底泥中の粒子状金属の濃度レベルとその底生生物への影響

東京工科大学・応用生物学部 浦瀬太郎
港湾空港技術研究所・海洋水工部 内藤了二

1. はじめに

我が国の環境基準の水生生物に対する影響については、水中濃度での評価が主体となっており、泥中の化学物質濃度による環境影響は考慮されていない。しかし、底生生物のように泥と密接な関係があるものに対する生物影響を考えると、底質濃度や水中懸濁成分濃度を評価する必要がある。浚渫土砂を干潟造成や覆砂材並びに浚渫窪地修復材等への有効利用を行う際にも重要な視点となる。これまで底泥中の化学物質濃度が大きく影響すると考えられる底生生物への影響は、日本の沿岸海域での情報としてはほとんどない。

環境基準は、現在水中濃度の溶存態、粒子態を合わせた総量で規定されているが、底生生物と底泥中の化学物質濃度との関係を明らかにすることにより、環境基準濃度をより合理的に設定できる可能性がある。金属類の濃度分布パターンのうち、とりわけ亜鉛および鉛の濃度分布は都市流出の影響を大きく受けることがこれまでの研究¹⁾で明らかになっている。また、これらの都市流出のかなりの割合が粒子吸着状態と推定され、雨天時に合流式下水道越流水などの形で公共用水域に流出する。これらの粒子態の汚染負荷は、自然沈降や海水との混合による凝集により、都市沿岸の港湾域の底泥に蓄積される。いったん海底に堆積した物質は移動性に乏しく、蓄積する。また、航路・泊地は水深を維持するために浚渫が欠かせないが、港湾内の浚渫土砂は、粒径の小さな粒子が多く、それらには有害な化学物質が吸着し易く、そのため、浚渫土砂によって干潟などを造成しようとする、地域の住民や漁業従事者が生物影響を懸念するケースが多くある。

そこで、本研究では、底質の含有量による環境基準が設定されたダイオキシン類と、海洋汚染防止法令に定められている重金属類濃度を解析対象化学物質とし、港湾域の底泥中化学物質濃度分布実態と底生生物種の実態調査²⁾をもとに、底泥中化学物質と底生生物との関係について、手法上の限界を意識した上で、米国で提案されているガイドライン値⁴⁾を利用しての評価結果について報告する。

2. 調査方法

(1) 全国調査の調査対象港湾と地点

調査対象港湾は全国の 53 港湾、4 開発保全航路、3 湾域の合計 60 港湾等であり、図-1 に示す。現地採泥は、平成 2002 年 8 月から 9 月にかけて実施したものについて分析を行った。各港湾における調査地点数は、ダイオキシン類と物理試験は、167 地点、重金属類、有機塩素化合物等の溶出・含有量試験および底生生物分析は各 70 地点において調査を行った。調査地点の選定は、基本的に浚渫予定区域、海洋投入場所、覆砂、干潟、浅場造成の施工場所等とした²⁾。

(2) 試料採取

採泥は砂質の場合には、スミス・マッキンタイヤ型採泥器による海底表層泥の採取とし、試料が粘土質の場合など軟弱な場合には、エクマン・バージ型採泥器を使用した。表層泥の採取は、底質調査法（環境庁水質保全局長通達昭和 50 年 10 月環水管 120 号）に基づき採取し、現場観測項目（調査日時、天候、気温、水温、など）の観測を行った。また、東京湾の調査を除いて、底生生物（マクロベントス）試験に用いる試料も採取し、採取した試料を目合い 1mm のフルイで篩い分けを行い、ホルマリンで最終濃度が 10% になるように固定した。生物の同定は、種レベルまで行うことにしたが、属レベルにとどまったものもかなりあった。なお、生物試料の同定者は、地点数、採泥範囲が全国にまたがるため、複数で

行った。

(3) 底泥の分析方法

底泥の分析項目のうち、ダイオキシン類については、環境庁が平成12年3月に定めたダイオキシン類に係る底質調査測定マニュアルに準拠して、重金属類については、底質調査方法にしたがって、おこなった。底生生物については、可能な限り種レベルまで同定し、種類数、湿重量を指標として解析したが、一部、属レベルまでの解析となった。金属の分析については、全国調査、N港調査においては、フッ酸・硝酸分解法を用いた。

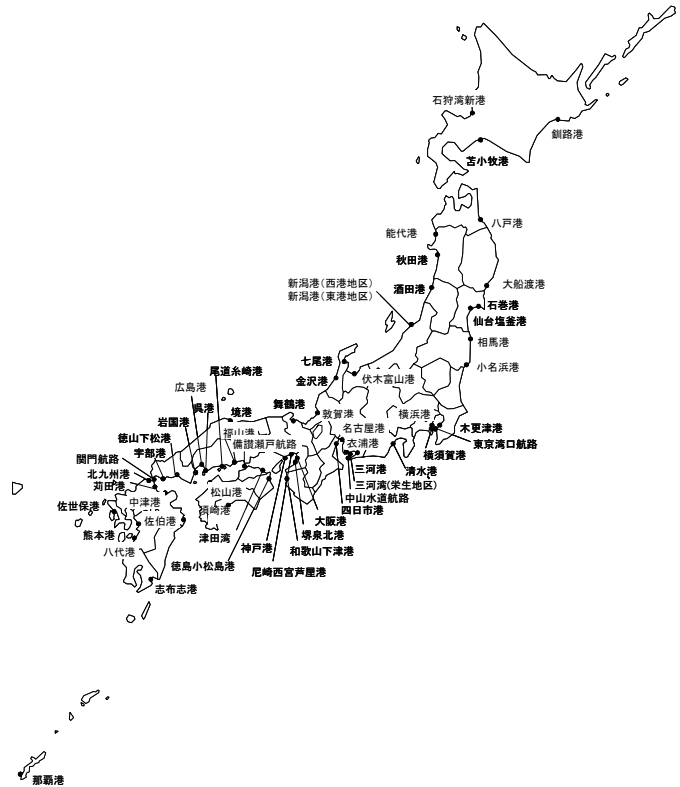


図-1 全国調査での調査地点

3. 全国調査の結果

(1) 調査結果の概要：汚染の頻度分布

全国の港湾域底泥中のダイオキシン類、重金属類およびPCB類、TOC、TON各項目の濃度について、最小値、最大値、それぞれ全検体数中の頻度分布の10%値、50%値、90%値を表-1

に示す。TOCは、底泥の有機物汚濁の程度を判断する指標として用いられる。測定値は、最小値0.6 mg/g～最大値50.8 mg/gの間で、50%値は13.2 mg/gであり、N港や東京湾での調査の値に比較して小さめであった。TONは、最小値0.1 mg/g～最大値3.4 mg/gの間であった。ダイオキシン類については、測定値は0.03 pg-TEQ/g～55 pg-TEQ/gの間で、環境基準値150 pg-TEQ/gを超過した港湾は存在しなかった。これは、今回の調査が浚渫を予定している海域などを対象としており、局所的に汚染の進んだ地点を採泥点としていないためである。

表-1 全国底泥調査の結果の濃度分布の範囲

物質名称	単位	最小値	10%値	50%値	90%値	最大値	検体数
ダイオキシン類	pg-TEQ/g-dry	0.032	0.91	5.3	20	55	165
TOC	mg/g	0.6	2.64	13.2	27.2	50.8	163
TON	mg/g	0.1	0.367	1.4	2.4	3.4	142
物質名称	単位	最小値	10%値	50%値	90%値	最大値	検体数
水銀又はその化合物	mg/kg	0.01	0.02	0.09	0.4	5	70
PCB	mg/kg	0.003	0.005	0.01	0.019	0.39	70
カドミウム又はその化合物	mg/kg	0.1	0.08	0.2	0.6	6.9	70
鉛又はその化合物	mg/kg	2.7	6	17.4	38	183	70
六価クロム化合物	mg/kg	0.2	0.2	0.5	2	2	70
ひ素又はその化合物	mg/kg	1.4	3	7.1	21	34	70
シアン化合物	mg/kg	0.01	0.01	0.5	0.5	0.7	70
銅又はその化合物	mg/kg	2	8.4	27	57	137	70
亜鉛又はその化合物	mg/kg	25.1	45	117	230	943	70
ベリリウム又はその化合物	mg/kg	0.5	0.7	1.2	5	5	70
クロム又はその化合物	mg/kg	8	21	42	150	410	70
ニッケル又はその化合物	mg/kg	4.4	8	19.3	39.6	84	70
バナジウム又はその化合物	mg/kg	0.5	3.6	46	93	190	70
セレン又はその化合物	mg/kg	0.1	0.1	0.2	1	1	70

重金属類では、六価クロムの濃度が低いのがこれは底泥中でこの元素の主要な存在形態ではないため「クロム又はその化合物」では高い港湾があった。その他の物質では、50%値が10%値の2～3倍、90%値が50%値のやはり2～3倍となる元素が多かった。一方PCBは、最大値0.39 mg/g、50%値が0.01 mg/gであった。最大濃度が90%値よりも一桁以上大きかったのは水銀及びPCBであり、特定の港湾に汚染

が集中していた。

(2) 底生生物の調査結果およびその有機物量との関係

本研究の底生生物調査で、多くの港湾で共通して見られた種の数はいずれもそれほど多くなく、存在した港湾の数の多かった種について、次に記す。軟体動物門では、シズクガイ *Theora fragilis* が 32 港湾で、イヨスタレガイ *Paphia undulata* が 8 港湾で、チヨノハナガイ *Raetellops pulchella* が 7 港湾で見られた。環形動物門では、Gycera 属の一種 *Glycera spp.* が 20 港湾で、アシナガギボシイソメ *Lumbrineris longifolia* が 20 港湾で、モロテゴカイ *Magelona japonica* が 20 港湾で見られた。節足動物門では、スガメソコエビ *Ampelisca spp.* が 6 港湾で、クビナガスガメ *Ampelisca brevicornis* が 5 港湾で、見られた。棘皮動物門では、イカリナマコ科の生物 *Synaptidae sp.* が 14 港湾で見られた。ほかに紐形動物門、腔腸動物門の生物が見られた。

底泥中の TOC と底生生物湿重量及び種類数の関係を、図-2、図-3 に示す。底生生物湿重量の調査結果をみると、TOC が 0~20 mg/g の間は、TOC が増加するとその環境で棲息し得る底生生物量が増加する傾向にあるが、TOC が 20 mg/g 程度以上では、逆に減少傾向であった。

一方、底生生物種類数で評価すると、TOC が高くなるにつれてその環境で棲息し得る種類数の上限は減少する傾向にあった(図の多数のサンプルを含む包絡線を引いた場合に右下がりであった)。このことから、底泥中の有機物含有量が小さいほど、底生生物叢の多様性が期待されるが、生物量は多少の有機物を含んだ底泥の方が多くなるとデータを解釈することができ、これ自体は、すでによく言われていることであるから、調査の方法の有効性を示していると考えられる。

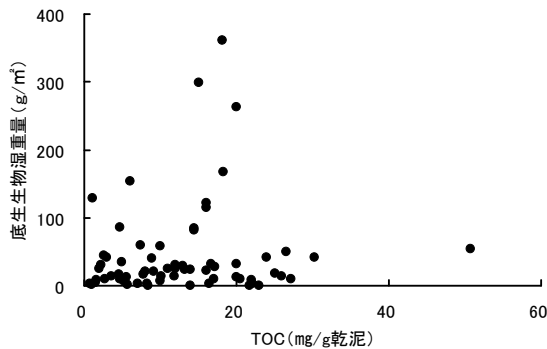


図-2 TOC と底生生物湿重量との関係

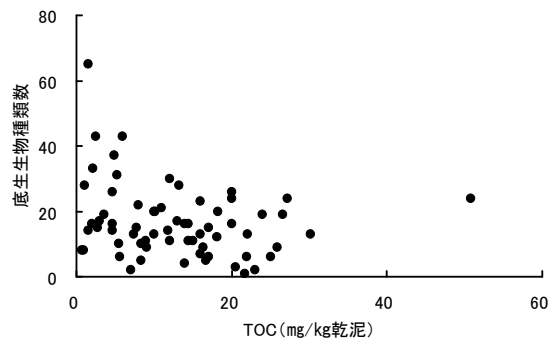


図-3 TOC と底生生物種類数関係

(3) ダイオキシン類濃度と底生生物の関係

ダイオキシン類濃度と底生生物湿重量の関係を、図-4 に示し、ダイオキシン類濃度と底生生物種類数の関係を図-5 に示す。特に汚染の強い海域を対象に実施した調査ではないので、ダイオキシン類濃度と底生生物を同時に測定した 70 地点のうち、わが国の底質の環境基準値である 150pg-TEQ/g を超過した地点はなかった。底生生物に対する影響についてのガイドライン値は明らかではないが、後述の米国 NOAA から示されている底質ガイドラインでは、PEL 値として、21.5pgTEQ/g を与えており、環境基準値以下であっても、何らかの生物への影響を排除することはできないと考えられる。本調査の結果からは、底生生物湿重量、底生生物種類数ともに、ダイオキシン類濃度が高い場合には、生物棲息環境が貧弱になる傾向があった。特に、ダイオキシン類濃度が 20 pg-TEQ/g を超過した場合、存在した底生生物は、二枚貝綱、多毛類綱、花虫綱などであり、種類数が少なかった。また、底生生物種類数の方が、底生生物湿重量よりもダイオキシン類濃度に対して、敏感な指標となった。ただし、この図に示された底生生物数のダイオキシン濃度依存性については、真にダイオキシンの影響であるのか、あるいは、貧酸素水塊の形成などがダイオキシン濃度が比較的高い水域で見られるための単なる見掛けの相関であるのかは、注意が必要である。

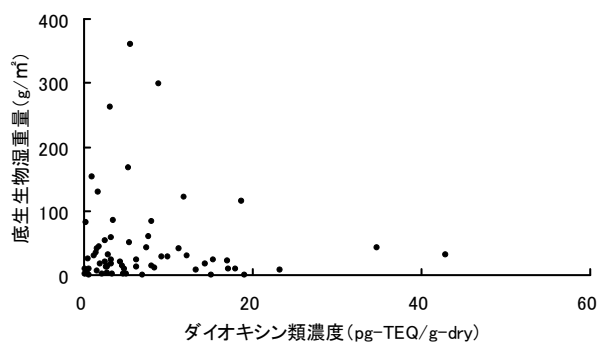


図-4 ダイオキシン類濃度と底生生物湿重量

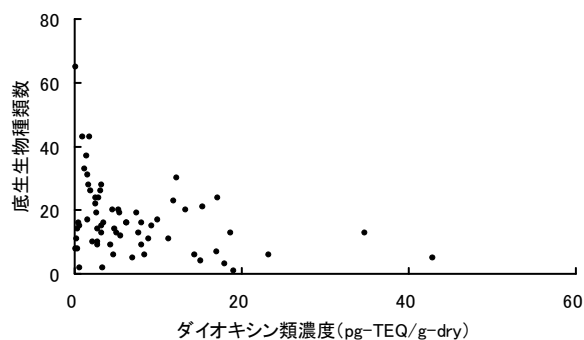


図-5 ダイオキシン類濃度と底生生物種類数

(4) 種ごとの存在個体数の亜鉛濃度依存性

重金属の底生生物への影響を調べるために、全国調査に一部大都市域の港湾での詳細調査地点を加えて亜鉛濃度に対して、それぞれの種の個体数をプロットした結果を図-5 に示す。10 調査地点以上で生息の見られた 26 種について解析を行った。港湾域の調査であることから、汚染に鈍感な種が抽出されている傾向がある。大きい個体数の種も小さい個体数の種もあることから、その種が最も数多くいた調査地点での個体数を 100%として、それに対する相対的な個体数で表示した。亜鉛濃度で 200 mg/kg 程度までは、特に影響が強く認められる種はないが、それ以上の亜鉛濃度の場合に見られる個体数の減少は、これが亜鉛の影響によるものなのか、それとも、それ以外の交絡因子によるものなのかは、慎重に議論する必要がある。ACTINIARIA, NEMERTINEA, *Musculista senhousia*, *Theora fragilis*, *Paphia undulate*, *Glycera chirori*などは、ERMをはるかに超える底泥を有する場所でも生息個体数が多い場所があり、必ずしも、亜鉛濃度には、個体数が敏感には影響を受けていないことが考える。詳細な種ごとの重金属感受性は今後の課題ではある。

(5) 重金属類濃度と底生生物種類数の関係

本研究の底生生物調査の結果を底生生物種類数を指標として、重金属類に対してプロットした結果を図-6 に示す。図では、米国の海洋大気庁の示す軽微な影響が見られる濃度 ERL, 中程度の影響が見られる濃度 ERM も参考のために示した。ERL は影響報告のデータを濃度の低い方から並べて 10%の値, ERM では同じく 50%の値であることから、影響があることと存在できることを同等と考えて、本来であれば、わが国の港湾では 60 種類程度の底生生物が存在できるうち、ERL の重金属濃度ならば最大 55 種類, ERM の重金属濃度ならば最大 30 種類が生息できると粗い仮定を考えて、もしも、その仮定が正しければ、(ERL, 55)と(ERM,30)を座標値とする直線を図-7 のグラフに引いたときに、この直線は、いずれの重金属についても大多数のデータを直線の左下側に包絡することになるはずである。もちろん、ここで、個体への毒性があることと個体群の消長への影響があること、群集としての存在種類数の間を単純に結びつけてよいかどうかは、議論が必要である。この直線は、生息できる最大数を示すことになるので、この包絡直線の左下側になる地点は、底生生物が、当該重金属以外の影響を受けて、種類数が規定されたと考えることが、生物棲息域評価手法である HEP の SI 直線の考え方⁸⁻¹⁰から可能である。

このような考えのもとに、図-6 を再度、考察すると、ニッケルやクロムについては、ERM を超えた地点でも生息する底生生物種類数の大きい海域が存在していることと、汚染の進んだ海域での試料数が少ないことから、今回の調査から明確に重金属と底生生物の関係を議論することはできないと考えられる。ヒ素や銅についても、ERM 付近のデータがほとんどなく、今回の調査結果から、重金属濃度と生物種類数の間に関係を見出すのは、難しい。一方、カドミウムと水銀については、わが国においては過去に激烈な公害を経験しており、図-6 のデータも有害性を強く示唆するように見える。しかし、すでに

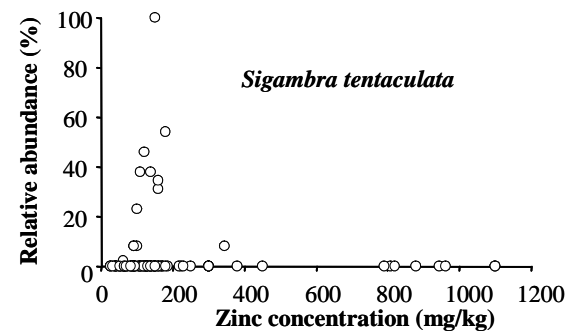
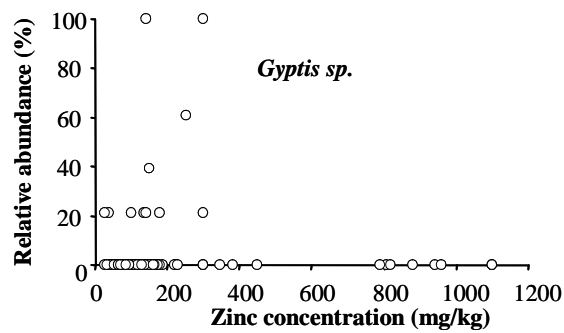
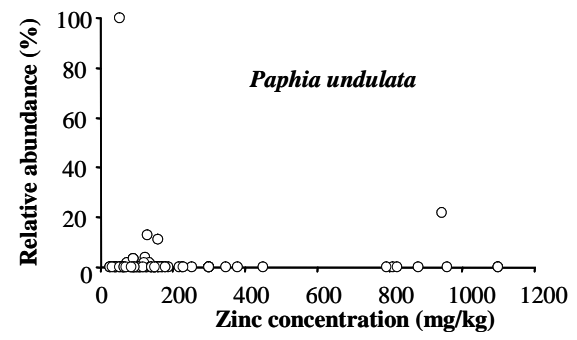
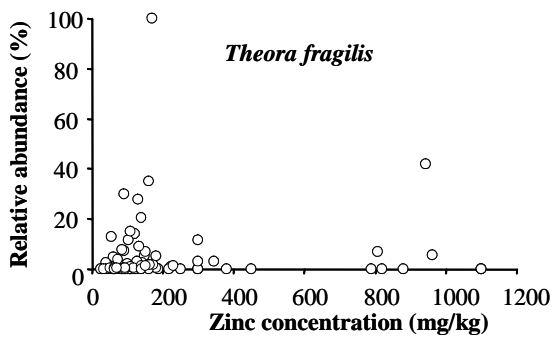
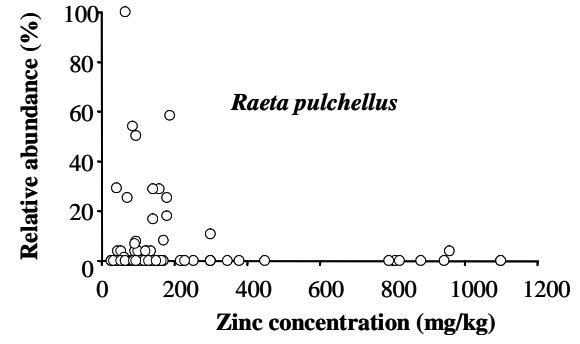
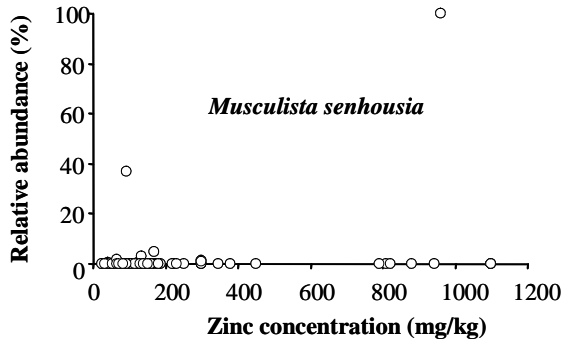
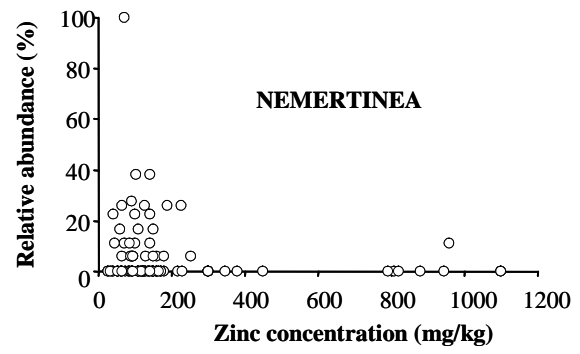
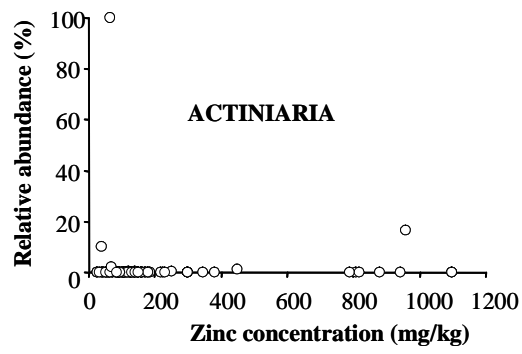


図-6(a) 全国調査および追加調査での個々の種の個体数と底泥中亜鉛濃度の関係

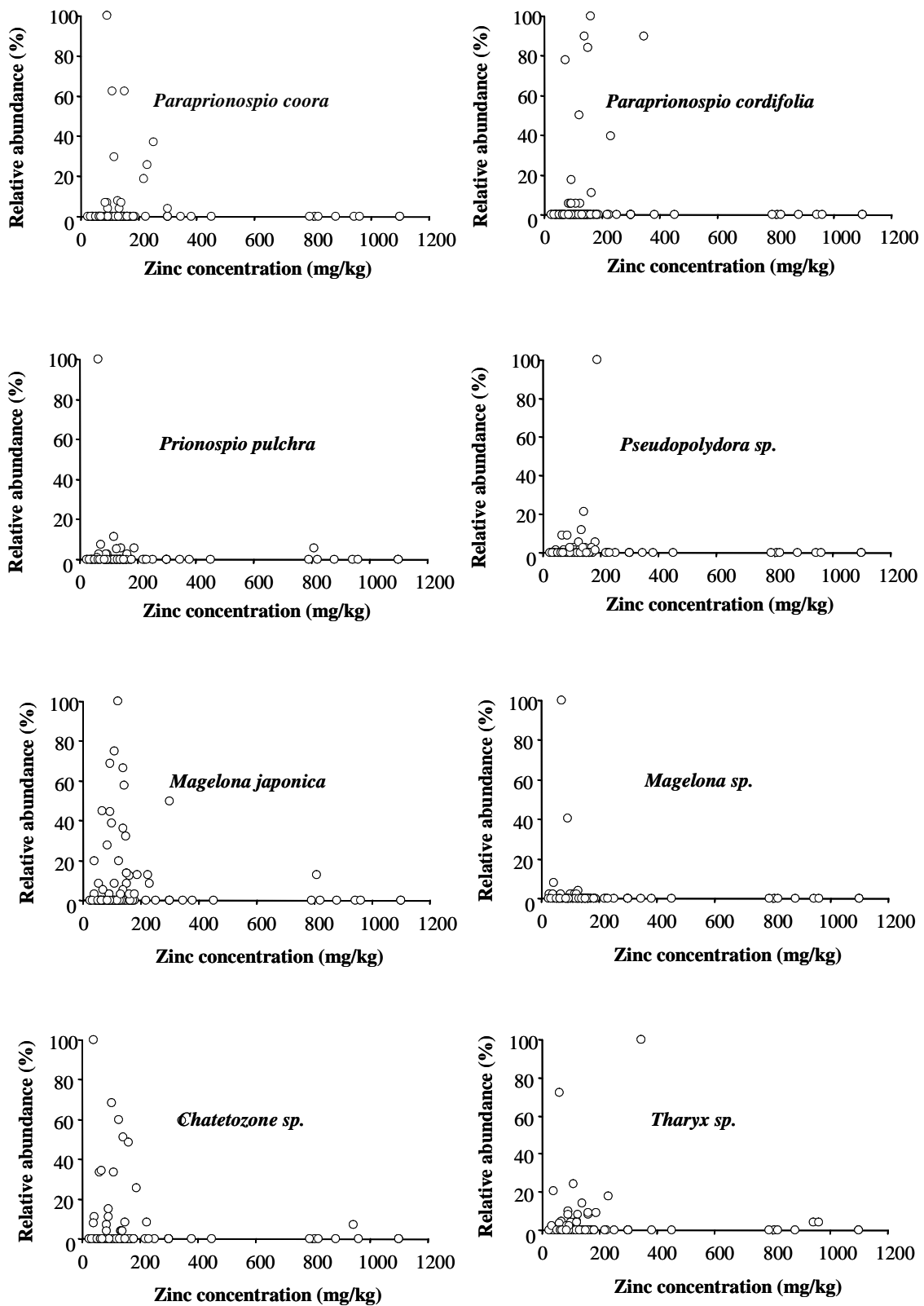


図-6(b) 全国調査および追加調査での個々の種の個体数と底泥中亜鉛濃度の関係

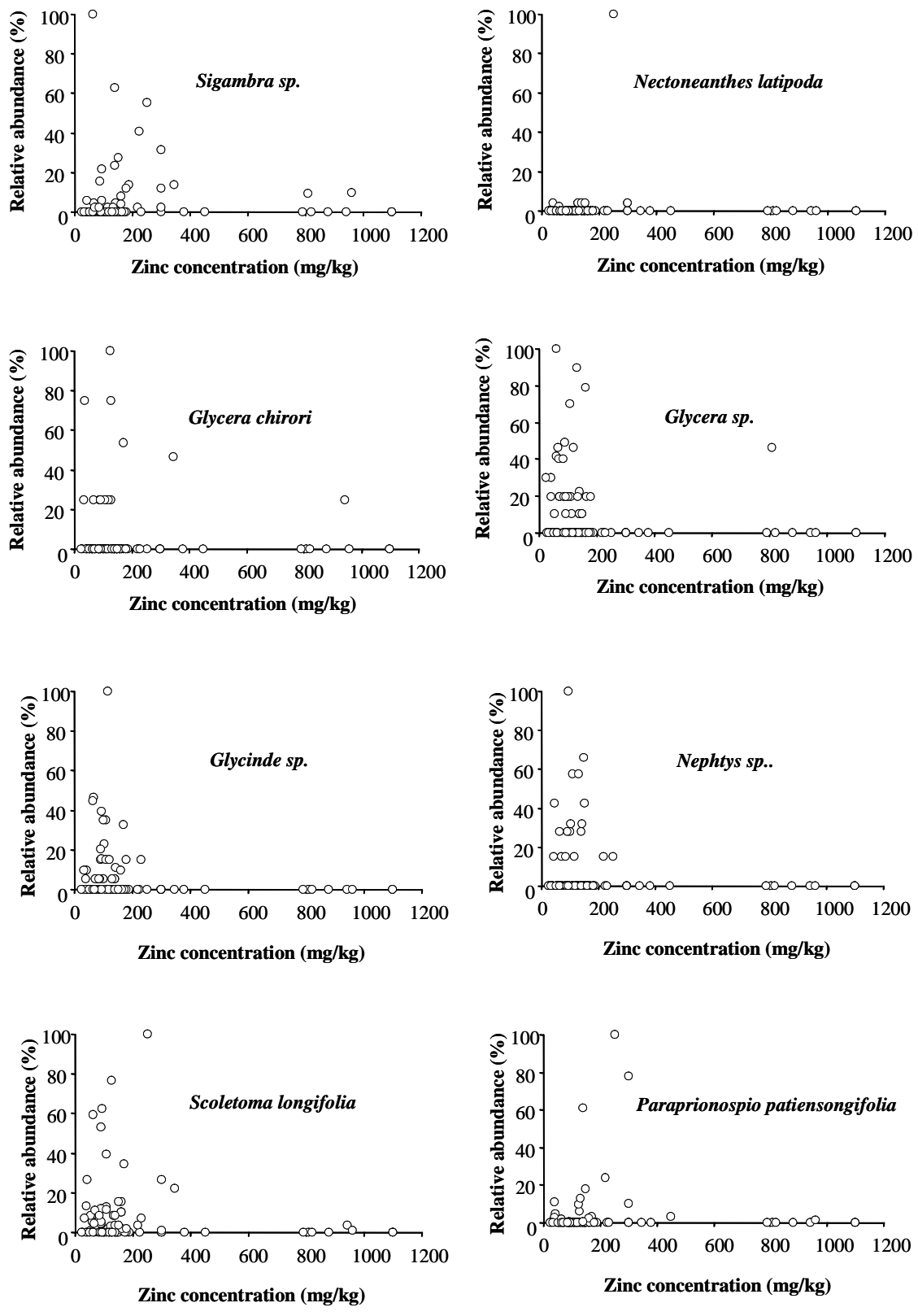


図-6(c) 全国調査および追加調査での個々の種の個体数と底泥中亜鉛濃度の関係

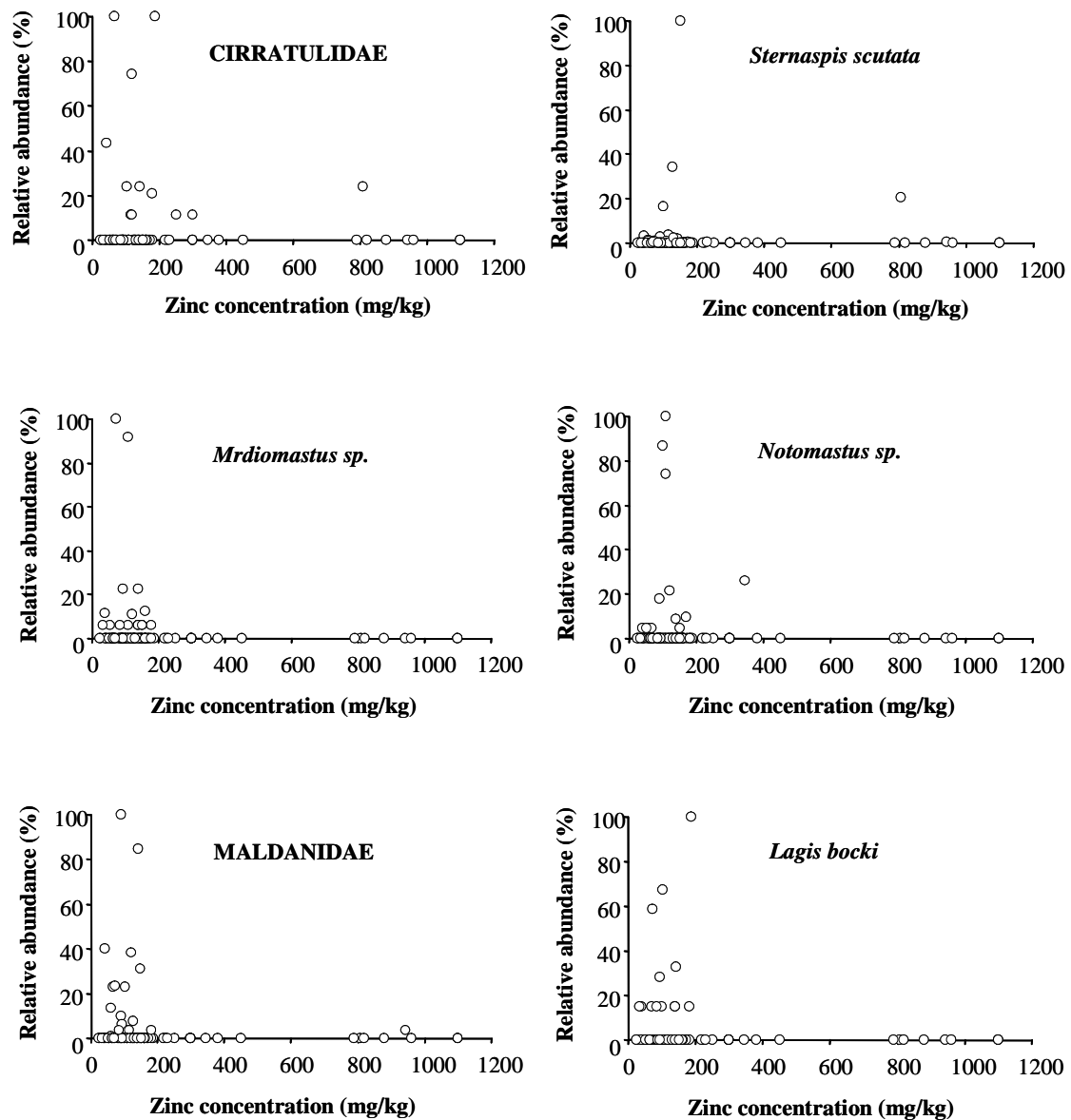


図-6(d) 全国調査および追加調査での個々の種の個体数と底泥中亜鉛濃度の関係

毒性が加味されたガイドライン値である ERL よりもかなり低濃度でも影響があるとの解釈が可能な図のプロット位置となっており、わが国の底生生物が米国のデータベースの元になっているものよりも金属感受性が強いのか、あるいは、当該重金属の持つ毒性ではなく、当該重金属以外の要因を含んで、見かけの重金属濃度依存性が評価されている可能性がある。重金属と底生生物の間に因果関係を見出すことができるかどうかは、明快な解釈が難しいが、カドミウムと水銀については、ERL に相当する軽微な生物生息種類数への影響が、ERL よりも低い値で認められた。水銀については、ERM を超える場所においても、20 種類を超える底生生物が見られており、また、カドミウムについては、ERM 程度の汚染の進んだ海域が今回の調査地点に含まれなかったことから、ERM に相当するかなりの影響の見られる濃度の妥当性を今回の調査結果から判断することはできなかった。鉛についても、カドミウムと同じで、ERL 以下の底泥中鉛濃度で、生息生物数に影響が出ているようにもデータからは見えるが、これが、鉛の影響であるかどうかは、はっきり結論することは難しいと考えられる。また、ERM 付近まで汚染の進んだ地点は調査地点に含まれなかったことから、ERM の妥当性を議論することはできなかった。亜鉛については、濃度と種類数について(ERL, 55)と(ERM,30)を結ぶ直線がかなりの確に実験データを包絡する。したがって、米国での ERL, ERM をそのままわが国の底生生物への重金属の影響のガイド

ライン値とすることも考えられるが、反面、亜鉛は都市流出の影響を受けやすく、有機物汚染と亜鉛による汚染が空間的に一致することが多く、金属の影響で種類数が制限されているのか、貧酸素など有機物汚染の影響で種類数が制限されているのか、分離が難しいと考えられる。

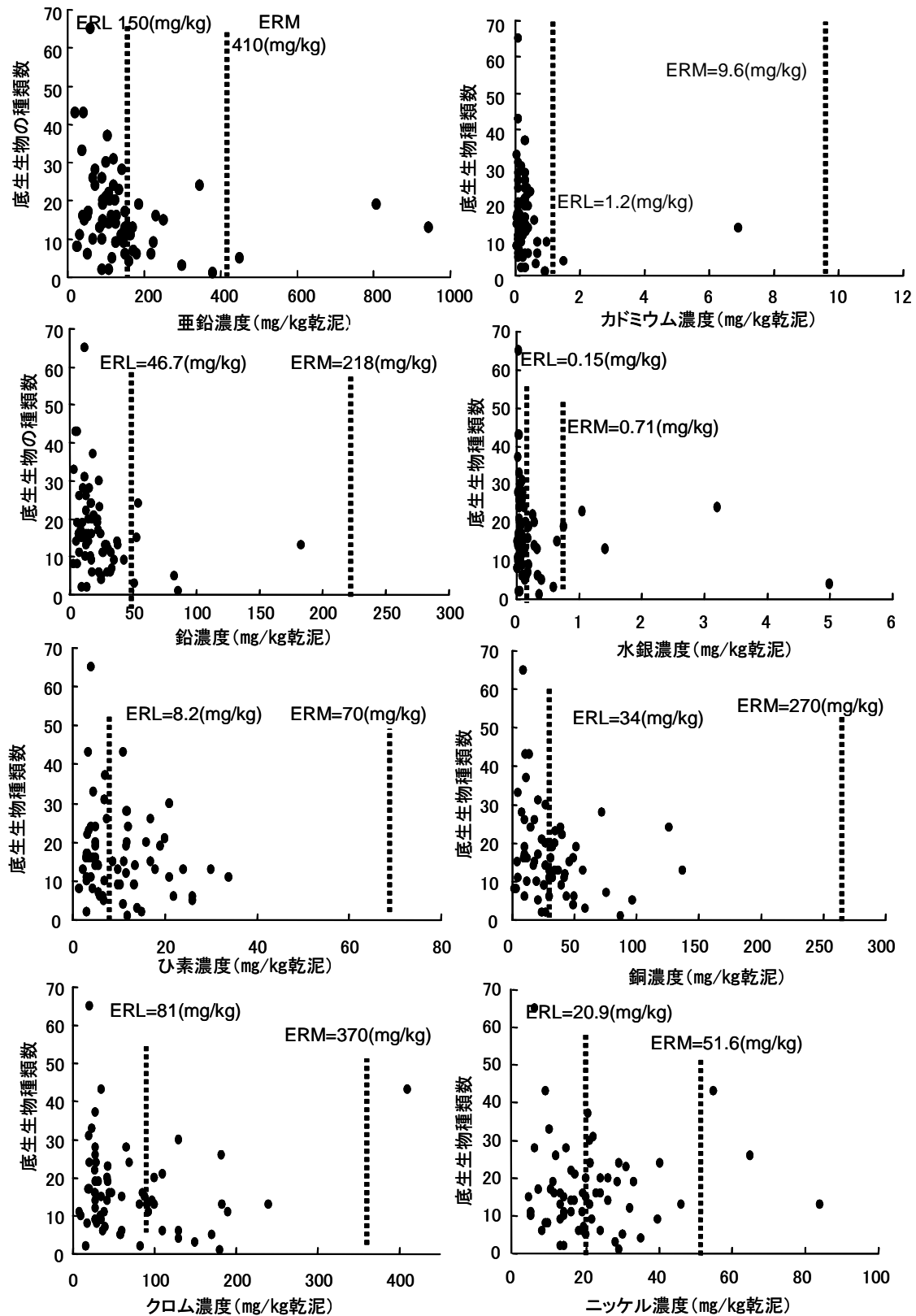


図-7 全国調査における金属濃度と底生生物種類数の関係および米国 NOAA によるガイドライン値

(6) 底泥中の重金属類濃度に関する外国のガイドライン

底泥の重金属汚染に関して、底生生物の生息環境の保全の観点から基準をもっている国はほとんどなく、多くは、ガイドラインとして、いくつかの複数の参考値を挙げている国が多い。Longら^{4,5)}は、海洋や河口現地底泥での底生生物と化学物質濃度の関係に関するデータベース（biological effects database for sediments, BEDS）を作成し、様々な化学物質に対して影響度の異なる2つのガイドライン値（effects range-low (ERL) と effects range-median (ERM)）を導出した。ガイドライン値はそれぞれの濃度の悪影響と関連の発生頻度により定義づけられ、何らかの悪影響があるとした報告例のうち低濃度側から10パーセント値の濃度を ERL, 50パーセント値の濃度を ERM とし、影響の発生率（影響が観察された数/全観測結果の数）として評価されている。この手法は底質評価のガイドライン値として、ある程度、頻繁に用いられているものであり、米国の海洋大気庁(National Oceanic and Atmospheric Administration)から公開されている。

MacDonald⁶⁾らは、ERL, ERM とは異なる手法を提案している。ERL, ERM の設定には使用されなかった生物に無影響であったという濃度データを活用し、threshold effects level (TEL)と probable effects level (PEL) の値を設定し、これらの濃度との大小関係によって、生物への影響度を区分している。さらに、Hyland⁷⁾らは、米国東海岸及びメキシコ湾岸の1,389地点の底質及び底生生物データを基に、底生生物群集への影響を評価する経験的な枠組みを構築する目的で、これらの調査データと既存のガイドライン値（ERM や PEL 値を含む）を比較検討している。また、ノルウエのグループが底質と底生生物の関係について、米国とは別に精力的に研究を続けている⁸⁾。おそらくは、北海の石油の採掘に伴う生物への影響などを明らかにする意図があるものと考えられる。

わが国においては、化学物質の底生生物の影響に関するデータベースが整備されていないが、本研究の結果から、交絡因子をさしあたって、無視して考えると、ERM に相当する強い影響を今回の調査から求めることは適切ではなく、またヒ素、銅、ニッケル、クロムについては明確な影響が示されないが、生息できる底生生物の種類数と重金属の濃度との間に、亜鉛では、米国の ERL 付近の濃度から生息できる種類数に影響があり、カドミウム、水銀、鉛では、米国の ERL 以下の濃度で、すでに、生息できる底生生物の種類数に影響が出ていると考えることができる。

(7) 重金属類濃度と生物影響に関して交絡する因子について

今回の調査は、泥の性状の把握のための調査であることから、溶存酸素が調査されていない。生物の生息環境として、もっとも影響のある要素である溶存酸素の影響によって、生息できる種数は大きく制限されることは、容易に想定されるが、溶存酸素に代わるひとつの指標としては、泥中の有機物含有量がある。また、泥の基本的な性状情報として、その細かさの指標となる粘土シルト分がある。粘土シルト分以外は、砂もしくは礫となることから、この値が大きいほど細かい底泥であったとすることができる。図-8に泥中の有機物含有量、粘土シルト分と亜鉛、鉛の含有量の関係を示す。図-8に示すように、有機物含有量と鉛、亜鉛の含有量は、ある程度の関連があり、有機物が多く含有する底泥ほど鉛や亜鉛の含有量が大きいことが分かる。また、粘土シルト分ともゆるやかな関係があり、細かい底泥ほど重金属含有量が多く、細かい成分に多くの重金属が含有されていることが分かる。一般に、貧酸素化は、流れが緩いシルト粘土分が多く、また、TOC 成分が多いヘドロ化した底泥で多く認められる現象であるから、鉛や亜鉛の濃度と底生生物の生息がある程度を示したとしても、それが、重金属の影響であるのか、貧酸素化の影響であるのかは、さらに詳細な検討が必要であると考えられる。

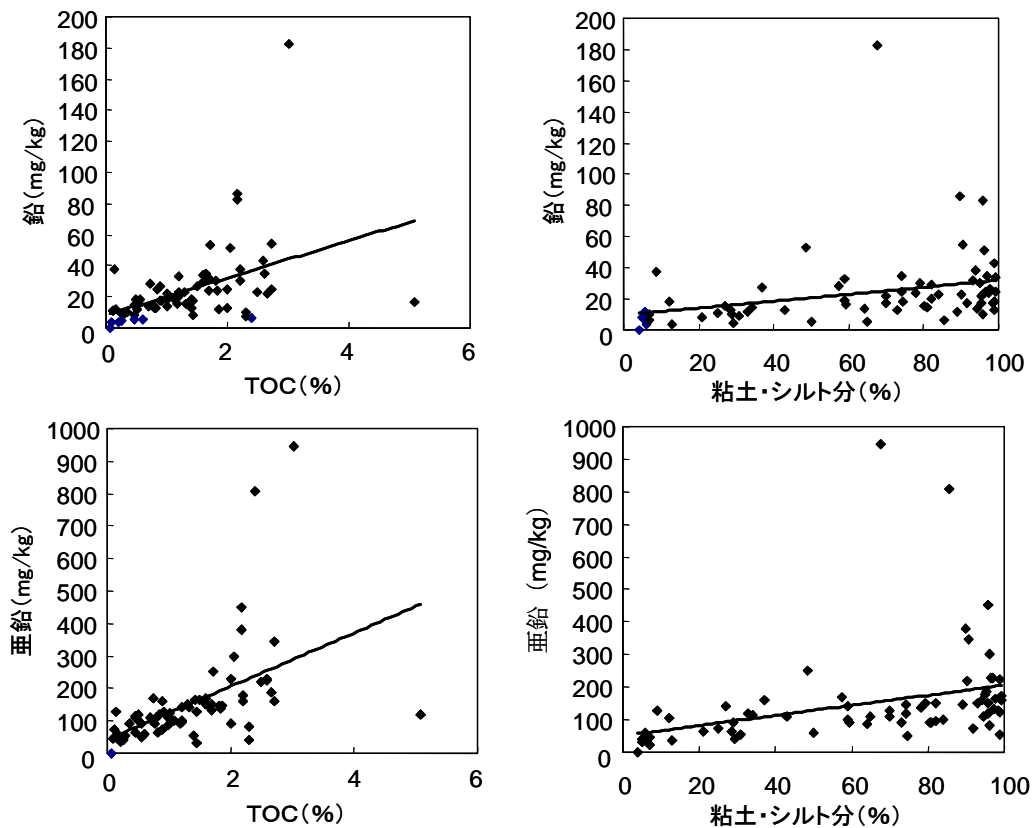


図-8 泥中の有機物含有量(TOC), 粘土シルト分と鉛および亜鉛含有量との関連

4. まとめ

底泥中重金属類の生物影響を評価するための基礎資料を得ることを目的とし、港湾域の全国一斉底泥調査を行い、ダイオキシン類や金属類の濃度と底生生物の関係を解析した。得られた結果は以下の通りである。

(1) 底生生物の湿重量と種類数それぞれについて、底泥の TOC との関係を調べた。TOC が増加するにつれてその環境で生息しうる種類数の上限は減少する傾向にあった。一方、湿重量については TOC 濃度によって傾向が異なり、TOC が 2%以下では生息しうる底生生物量は TOC の増加とともに増加する傾向にあったが、TOC が 2%以上では TOC の増加とともに減少する傾向にあった。

(2) ダイオキシン類濃度に対する底生生物の影響指標としては、底生生物種類数の方が湿重量よりも敏感であった。

(3) 底生生物の豊かさに対する化学物質濃度の影響を調べるため、米国 NOAA の底質ガイドライン値 ERM 及び ERL と底質中の金属濃度の実測値を比較した。頻繁に悪影響の発生がみられるとされる ERM 値を超過する底泥の検体が、水銀、亜鉛、ニッケル、あるいはクロムについて見出された。

(4) 生物棲息域評価手法である HEP の SI と同様の手法により、底生生物の種類数の上限と重金属濃度の関係を解析した。ニッケル、クロム、ヒ素、銅については、ERM を超えた地点でも生息する底生生物種類数の大きい海域が存在していることや汚染の進んだ海域での試料数が少ないことから、今回の調査から明確に重金属と底生生物の関係を議論することはできなかった。カドミウムと水銀、鉛については、強い毒性が示唆され、ERL に相当する軽微な影響は、米国の ERL よりも低い汚染濃度で認められた。ただし、底生生物種類数の見かけの重金属濃度依存性が貧酸素などの別の支配的な要因を強く受けている可能性があることを考慮する必要がある。かなりの影響が考えられるとされる ERM 値については、水銀については ERM を超える汚染のあった場所においても、20 種類を超える底生生物が見られ

ていることや、また、カドミウム、鉛については、ERM 程度の汚染の進んだ海域が今回の調査地点に含まれなかったことから、今回の調査結果に基いてその値の妥当性を議論することはできなかった。亜鉛については、米国での ERL, ERM をそのままわが国の底生生物への重金属の影響のガイドライン値とすることに今回の測定データの上からは矛盾が少ないと考えられるが、反面、亜鉛は重金属汚染の中でも、有機物汚染と空間的に一致することが多く、金属の影響で種類数が制限されているのか、貧酸素など有機物汚染の影響で種類数が制限されているのか、分離した影響の同定が難しかった。また、個体への毒性データ、個体群への影響、群集の種類数の影響に関しては、直接結び付けられるべきものではないため、さらに詳細な検討が必要と考えられるが、十分な解析ができなかった。

関連事項 多摩川、荒川のような大河川から供給される非汚染土壌粒子に含まれる亜鉛や鉛濃度は、わが国の地質を考えた場合、一部の地域を除いて、生物影響の考えられるガイドライン濃度よりも小さく、全国調査の底泥の濃度は、このような自然由来の汚染の状態の濃度に対応している。一方、大都市に隣接した港湾では、これらの金属の濃度レベルが高い場所があり、工場由来の局地汚染の場合を除くと、これらの金属が、道路などを起源として、都市近郊の水域に流入していることによって、都市近郊の底泥中の金属濃度を生物影響が考えられる ERL ガイドライン値以上にまで上昇させていることが、これまで報告されている道路わき粉塵や雨水枡堆積泥の調査から考えられた。

謝辞

本研究の一部は、鉄鋼業環境保全技術開発基金の助成を受けて行ったものであることをここに記して感謝する。「内藤了二、中村由行、浦瀬太郎、金子尚弘(2007): 港湾域の底泥中化学物質濃度と底生生物叢の関係、環境工学研究論文集, 44, 7-16.」として発表したものである。

参考文献

- 1) Urase T., Nadaoka. K., Yagi H., Iwasa T., Suzuki, Y., Siringan F., Garcia, T. P. and Thato, T. T. : Effect of urban emissions on the horizontal distribution of metal concentration in sediments in the vicinity of Asian large cities, *Journal of Water and Environment Technology*, Vol. 4, pp. 61-71, 2006.
- 2) 国土交通省港湾局環境整備計画室, (財)港湾空間高度化環境研究センター: 平成 14 年度港湾環境の保全に関する調査-港湾底質及び海洋環境保全に関する総合的検討-報告書, 2003.
- 3) 岩佐知洋, 浦瀬太郎: 雨水ます中の堆積泥に含まれる重金属の濃度分布, 水環境学会誌, 28, 10, 637-641, 2005.
- 4) Long E. R., MacDonald D. D., Smith S. L. and Calder F. D.: Incidence of adverse biological effects within ranges of chemical concentrations in marine and estuarine sediments, *Environmental Management*, Vol. 19, pp. 81-97, 1995.
- 5) Long E. R., and MacDonald D. D. : Recommended uses of empirically derived, sediment quality guidelines for marine and estuarine ecosystems, *Human and Ecological Risk Assessment*, Vol. 4, pp. 1019-1039, 1998.
- 6) MacDonald D. D., Carr R. S., Calder F. D., Long E. R., and Ingersoll, C. G.: Development and evaluation of sediment quality guidelines for Florida coastal waters, *Ecotoxicology*, Vol. 5, pp. 253-278, 1996.
- 7) Hyland J. L., Balthis W. L., Engle V. D., Long E. R., Paul J. F., Summers J. K. and Van Dolah R. F. : Incidence of stress in benthic communities along the U.S. Atlantic and Gulf of Mexico coasts within different ranges of sediment contamination from chemical mixtures, *Environmental*

Monitoring and Assessment, Vol. 81, pp. 149-161, 2003.

8) Bjorgesaeter A., Gray J. S. : Setting sediment quality guidelines: A simple yet effective method, *Marine Pollution Bulletin*, 57, 221-235, 2008.

8) 島多義彦, 西村 修, 野村宗弘, 中村由行, 木村賢史, 市村 康, 袋昭太 : 干潟・浅場におけるマクロベントスの種多様予測・評価手法の開発, *海岸工学論文集*, 第 52 卷, pp. 1166-1170, 2005.

9) 浜本洋, 風間聡, 澤本正樹 : HSI モデルを用いた流域生物多様性の評価, *環境工学研究論文集*, Vol.43, pp.559-567, 2006.

10) 原田新, 中田典秀, 山下尚之, 佐藤修之, 伊藤光明, 鈴木 穰, 田中宏明, 古米弘明 : 全国河川水質分布との相対比較による都市再生水の水質評価, *環境工学研究論文集*, Vol. 43, pp. 501-508, 2006.