

7. 漂着ゴミ汚染と有害化学物質 ～発泡スチロール片～

岡山 伸吾^{1*}・山口 晴幸^{2**}

¹防衛大学校理工学研究科前期課程（〒239-8686 神奈川県横須賀市走水1-10-20）

²防衛大学校建設環境工学科（〒239-8686 神奈川県横須賀市走水1-10-20）

* E-mail:em49054@nda.ac.jp

** E-mail:yamaguch@nda.ac.jp

海岸漂着ゴミで深刻なゴミとなっている発泡スチロール類のゴミは、漁具類に転用されている発泡スチロールブイ類のゴミが主体である。日本列島の多くの海岸線には漁具類として使用された発泡スチロールブイやその破片群が大量に打ち上がり、海岸線真っ白に染め上げる白帯化汚染を誘発し、海岸線の景観や自然環境を破壊あるいは著しく損ねている。また一端海に出ると延々と海洋を漂流・浮遊し、越境移動して他国の海岸に漂着する可能性も非常に高い。そのため漂流・浮遊中には、多孔質な構造を有する発泡スチロールブイやその破片群は、海洋で有害物質を吸着・付着（溶出）して、運搬・拡散・移動させる汚染物質の「運びや（キャリア）」としての役割を果たすことが懸念される。全国的調査の一環として、今回は、琉球列島など全国各地の海岸と米国ハワイ島で採取した漂着発泡スチロール片からの重金属類等の溶出性について考察している。

Key Words : marine litter, harmful substance, polystyrene foam, heavy metal

1. はじめに

海岸線の深刻な景観破壊や自然破壊を齎す漂着ゴミの実態解明に向けて、当研究室では、その発生源や海岸域的特徴（漂着ゴミの国籍や種類等）などについて全国調査を十数年に亘って継続している。近海を黒潮海流が北上する琉球列島（特に八重山・宮古諸島）や対馬海流沿いの日本海沿岸域・離島では、特に、中国・韓国・台湾の近隣アジア諸国からの海洋越境ゴミの漂着が深刻な問題となっている。海岸漂着ゴミの種類は多岐に亘るが、プラスチック容器類を主体とした生活廃棄物とブイ・漁網等の漁業廃棄物に大別される。中でも漁具類等として使用された大小様々な発泡スチロールブイやその破片群の大量漂着は、海岸線を白色に染め上げる白帯化汚染を誘発し、海岸線の景観・自然環境の破壊・汚染に拍車をかける重大な要因となっている（写真1）。軽量なため一端海岸に漂着した発泡スチロール類のゴミは、風等で容易に内陸部に吹き上げられ、貴重な海浜植物や防潮風林などに食い込み、植物生態系にも深刻な打撃を与えている

（写真2）。また軽量ではあるが容積が大きくかさばり、清掃運搬や処理処分が非常に厄介で、全国的に対処に苦慮している漂着ゴミとなっている。大きいものは直径1mを超え、長さ2～3mにも及ぶ円柱状のブイもよく打ち上がっている（写真3）。発泡スチロールが漁具類用ブイとして加工・利用されるの

は、ガラス製やプラスチック製ブイよりも極めて安価で軽量成形しやすいためと思われる。しかしガラス製やプラスチック製ブイに比較して、材料強度や構造的

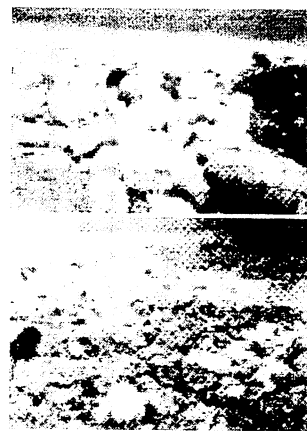


写真1 漂着発泡スチロール片



写真2 植生帯に大量漂着

には極めて軟弱で脆弱であることから、高波や強風の波風力作用によって、容易に破断・破損し夥しい数の破片状漂着ゴミと



写真3 大型発泡スチロールブイの漂着

なって海岸に打ち上がることになり、深刻な海岸汚染を引き起こす原因となっている。利用する場合には、構造的改善や技術的裏付けに基づく使用許可の認定制度などを導入していく対策・工夫が求められる。

さらにこのような発泡スチロールブイ等のゴミは、一端海に出ると延々と海洋を漂流・浮遊し、越境移動して、他国の海岸に漂着する可能性も非常に高い。そのため漂流・浮遊中に、多孔質な構造を有する発泡スチロール類のゴミは、海洋で汚染物質を吸着・付着(溶出)して、運搬・拡散・移動させる「運びや(キャリア)」としての役割を果たしているのではないかという懸念を、以前から抱いていた。

2007年3月の長崎県対馬での漂着ゴミ調査の際、朝鮮半島側に面する数ヶ所の海岸では、長年打ち上がった発泡スチロールブイやその破片群が1~2mの厚さで堆積した状況にあった。下部に堆積したものは劣化して粒状に分解し異臭を発していた(写真4)。化学物質の曝露が懸念されたことから、劣化・分解した発泡スチロールの粒状物質と周辺に散在していた発泡スチロールの小片をサンプリングし、初めて有害物質の化学分析を試みている¹⁾。人を含め生態系に好ましくない重金属類を主体に10元素成分を対象に実施した溶出性についての定量分析では、ほとんどの元素成分において、その溶出性が検証された。中には、かなり高い溶出濃度が検出される元素成分も確認されている。このことから、漂着発泡スチロールブイやその破片群は、有害物質を吸着・付着(溶出)して運搬・拡散・移動させる「運びや(キャリア)」としての新たな汚染指標的役割を担っている可能性の高いことが示唆された。

全国的調査が要求されることから、現在、サンプリング調査を全国に拡大している。本報告では、その一環として、2008年に全国の主要な海岸域から採取した漂着発泡スチロール片を対象に分析評価を実施し、漂着発泡スチロール片の有害物質の「運びや(キャリア)」としての危険性を広域的に実証することを試みている。

2. 本研究の目的

本研究での主目的は、「漂着ゴミ汚染と有害化学物質の評価究明」という観点から、「大量漂着する発泡スチロールブイやその破片群が、海洋を漂



写真4 粒状に劣化腐食した発泡スチロール片

流・浮遊中に有害物質、特に重金属類等の元素成分を吸着・付着(溶出)して海岸に打ち上がり、海岸汚染を誘発する危険性はないのか」という懸念性を広域的に検証・実証することにある。即ち、漂着発泡スチロール片が有害物質を吸着して運搬・拡散・移動させる「運びや(キャリア)」としての危険性の解明に力点を置いている。

発泡スチロール片の漂着した海岸域やその海岸域が面する海洋・海域などの地勢・水質、漂流漂着の経路・期間などの複雑な要因によって、漂着発泡スチロール片から溶出する有害物質の種類や溶出濃度は当然異なるものと推察されることから、2007年春季の長崎県対馬での海浜調査に引き続き、全国的調査と分析を継続している。ここではその一環として、琉球列島(主に八重山諸島)、関東沿岸域(東京湾・相模湾)、新潟県沿岸(特に佐渡島)、小笠原諸島硫黄島、米国ハワイ島などの種々の海岸・海域で2008年に採取した漂着発泡スチロール片を対象に、有害な重金属類等の10元素成分の溶出性について考察し、海浜砂からの溶出性との比較検証から、漂着発泡スチロール片の有害物質の「運びや(キャリア)」としての広域的な危険性について警鐘を鳴らす。

3. 発泡スチロール片の漂着実態

我が国の漂着ゴミ問題の調査研究に長年に亘って全国規模で取り組んでいる共著者の山口は、最近までのこの10年間に及ぶ琉球列島での調査結果をまとめ、社会的に公表している²⁾。1998年から2007年までの10年間に年2回

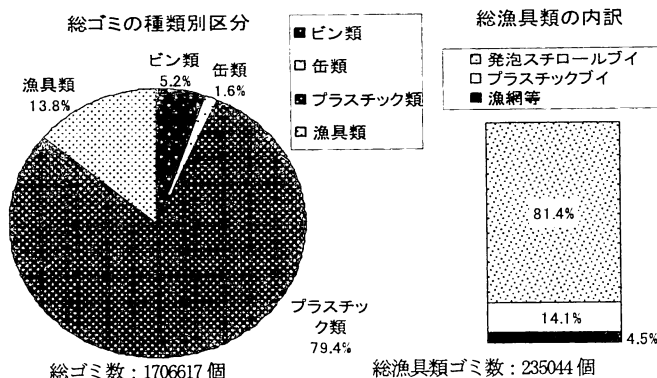


図1 琉球列島 10年間調査での漂着ゴミの種類別分析

の調査を続け、東シナ海と太平洋に囲まれた沖縄諸島、宮古諸島、八重山諸島での13島延べ517海岸で数え上げた漂着ゴミの総数は、170万個以上に及ぶ。漂着ゴミの国籍別分析では、日本製ゴミが約4%で、外国製ゴミがその約6倍に上る約23%であった。国籍不明のゴミが約73%占めていたが、「長く漂流するほど国籍不明になりやすいことから、この不明ゴミにも外国製ゴミが相当数含まれている」と指摘している。海岸線1km当りの漂着ゴミ数に換算して比較すると、この10年間で日本製ゴミはほぼ一定であったが、外国製ゴミは6倍に増大し、特に中国由来のゴミが13倍に急増しており、琉球列島での深刻な漂着ゴミ問題は、中国製ゴミを主体とした外国製ゴミであることを明らかにしている³⁾。

種類別分析では、総ゴミ数の約80%が自然分解の難しいペットボトル

や容器類等のプラスチック類ゴミであった(図1)。その内、漁具類ゴミ(ここでは漁網、大型プラスチックブイ、発泡スチロールブイの3種類が対象)の総数は235,044個で13.8%であったが、大半が漂着発泡スチロールブイ(比較的大きな破片も含む)で、漁具類ゴミ数の81.4%を占めていた³⁾。



写真5 マングローブ群落の漂着ゴミ



写真6 長崎県対馬三宇田浜の実態

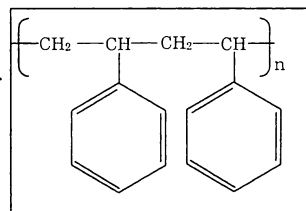
沖縄県八重山諸島の島々では、マングローブ群落や海浜林植生帯が夥しい数の漂着発泡スチロール片で埋め尽くされた光景に遭遇する機会が多く(写真5)、亜熱帯海浜域の貴重な動植物の生態系や湿地・干潟環境に深刻な打

撃を与えている^{4)~6)}。

このように主に漁具類に使用された発泡スチロールブイやその破片群の大量漂着は、沖縄県の島嶼のみならず、長崎県対馬や新潟県佐渡島などをはじめ、全国的に離島・沿岸域で深刻な問題となっている(写真6)。しかも軽量ではあるが容積的に膨大なので、海岸線の甚大な景観破壊を誘発する主因となっている。

4. 発泡スチロールの化学構造と成分

発泡スチロールはポリスチレンを微細な泡で発泡させ硬化させた合成樹脂素材で、基本的には炭素(C)と水素(H)からなる炭化水素の化学構造を有している(図2)。即ち気泡を含ませたポリスチレンのことで、発泡ポリスチレン、発泡スチレン、ポリスチレンフォーム、スチレンフォームの別称がある。製法によって、①ビーズ法発泡スチロール(EPS)、②ポリスチレンパーパー



(PSP)、③押出ポリスチレン(XPS)の3種類のタイプがあり、化学的性質・構造はほぼ同じであるが、形状や気泡の特性が異なるため、用途も異なっている。最初に開発されたEPSは用途も広く、狭義の意味で発泡スチロールと称される場合もある。漁具類のブイに使用されている発泡スチロールの場合もこのEPSが大半である。EPSの漂着ブイを破断するとビーズと呼ばれるポリスチレンの粒を発泡させた小粒子が融着した状態となっているのがよくわかる(写真7)。この発泡小粒子は直径1mm程度のポリスチレンビーズに炭

化水素ガスを吸収させ、100℃以上の高温蒸気を当てて樹脂を軟化させると共に、圧力を加えて発泡させたものである。発泡の際、ビーズは互いに融着し、冷却時に様々な形状になって硬化して、発泡スチロールの樹脂となる。

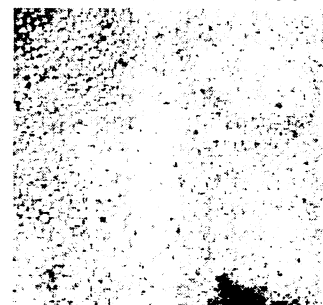


写真7 発泡ビーズの粒子形状

5. 調査海岸域とサンプリング

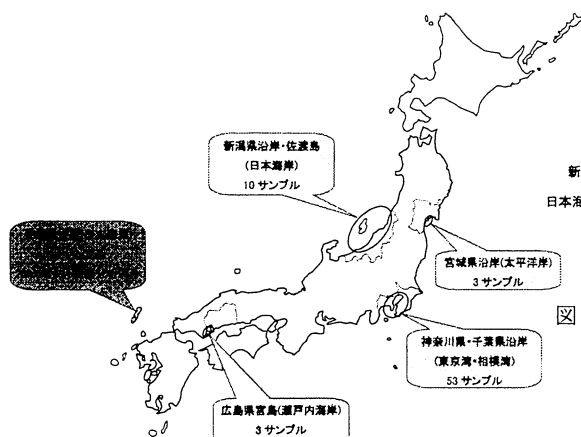


図3 日本列島での主要な調査海岸域(2008年調査)

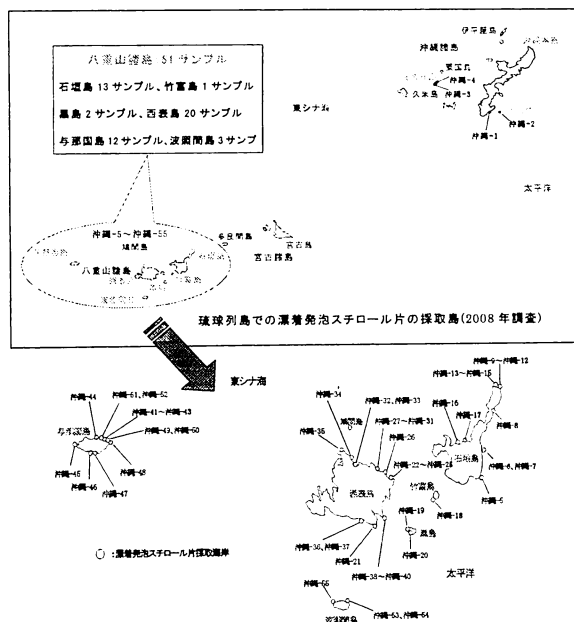


図4 琉球列島及び八重山諸島での調査海岸域(2008年調査)

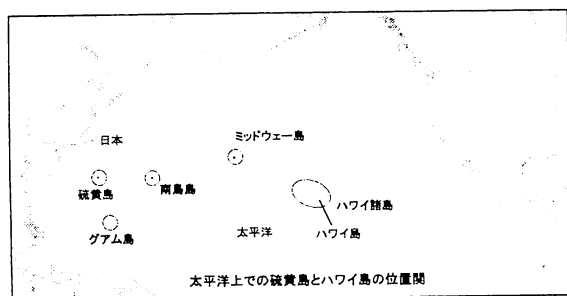


図5 東京都小笠原諸島硫黄島と米国ハワイ島(2008年調査)

(1) 調査海岸域

漂着発泡スチロールやその破片群が、広域的に有害物質の「運びや(キャリア)」としての役割を果たしている可能性が高いとすれば、当然、海洋・海域や漂流漂着ルートによって発泡スチロール片に吸着(溶出)・運搬される有害物質の種類や濃度の異なることが想定される。そのため漂着海岸や海域などの地勢の特徴を考慮して、全国的に調査海岸域を設定しサンプリングすることが必要

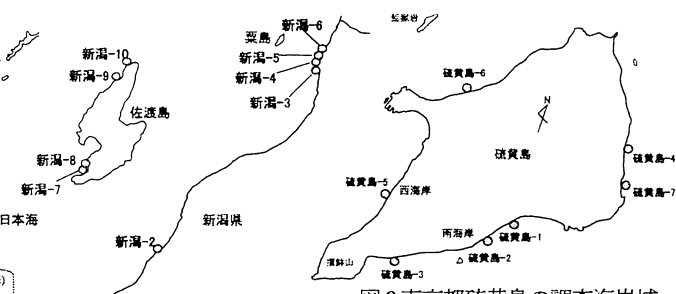


図6 新潟県沿岸・佐渡島の調査海岸域

となる。

本研究では、全国的調査の第一段階として、まず2008年の調査海岸域を提示する(図3～図5)。2007年3月の長崎県対馬のサンプリング調査(漂着発泡スチロール片を2海岸で14サンプル採取)に引き続き、2008年には日本海岸域の新潟県沿岸・佐渡島(7海岸で10サンプル)、太平洋岸域

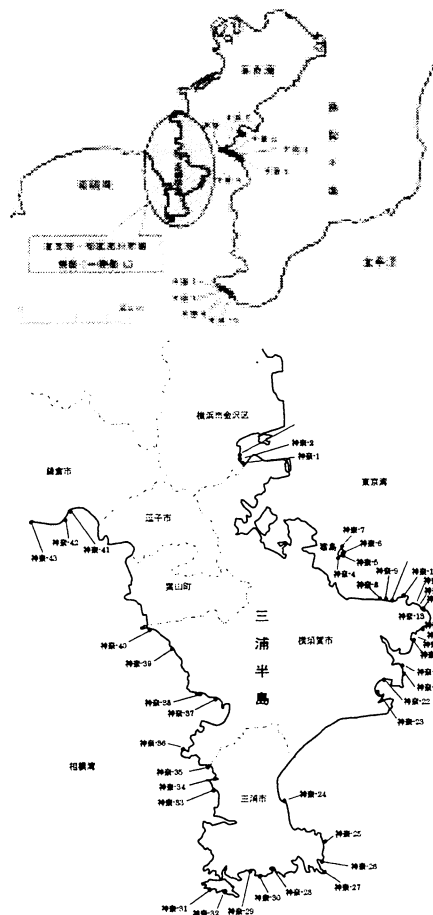


図7 神奈川県・千葉県東京湾・相模湾沿岸

の宮城県仙台市沿岸(1海岸で3サンプル)と神奈川県・千葉県東京湾・相模湾沿岸(38海岸で53サンプル)、瀬戸内海岸域の広島県宮島(3海岸で3サンプル)、さらに東シナ海と太平洋に囲まれた沖縄県八重山諸島を中心とした9島嶼(35海岸で55サンプル)、太平洋上の東京都硫黄島(6海岸で7サンプル)、米国ハワイ島(3海岸で3サンプル)でサンプリング調査を実施している。なお新潟県沿岸・佐渡島(図6)、神奈川県・千葉県の東京湾・相模湾沿岸(図7)、沖縄県の八重山諸島(図4)、東京湾から太平洋沖合約1300kmの小笠原諸島硫黄島(図8)については、漂着発泡スチロールのサンプリング地点を明示している。

表1には各調査海岸域における漂着発泡スチロール片

のサンプリング状況をまとめています。2008年の調査海岸数は90海岸で、134サン



プルの漂着発泡スチロール片を採取分析している。海岸長の長い海岸では、1海岸で複数のサンプルを採取している。なお有害物質のバックグラウンド値的な指標値として評価するために、各海岸域では同時に、波打ち際付近の海浜砂の採取も試みている。

(2) 漂着発泡スチロール片のサンプリング時の留意事項

海岸に打ち上がった漂着発泡スチロール類のゴミは、漁具類のブイとして使用されたものが大半を占めている。直径1m・長さ2mを超える円柱の大型発泡スチロールブイもよく見かけるが、多くは海洋を漂流・浮遊中に破損・破断して、種々の形状・大きさの破片状となって漂着したことが多い。対象海岸を代表するサンプルの採取を図ることから、漂着発泡スチロール片のサンプリングに際しては、下記の事項に留意した(写真8)。

- 1) 海岸で特定の場所に集積している発泡スチロール片をサンプリングするのではなく、できる限り海岸全長に亘って、万遍なくサンプリングを行うことに努めた。
- 2) 長期間海洋を漂流浮遊していたと思われる発泡スチロール片を採取するために、波に揉まれて磨耗し角張りの削れた丸形状の小片をサンプリングすることに努めた。
- 3) できるだけ多くの発泡スチロール片を折損して収集し、一つのサンプルとすることに努めた。
- 4) 大型の発泡スチロールブイなどは、部分的に小片をむしり・剥ぎとって、サンプルの一部とした。
- 5) 明らかに漁具類以外の容器や緩衝材に使用されたとと思われる発泡スチロール片のサンプリングは回避した。
- 6) 海浜砂に埋もれた発泡スチロール片や、漂着後長期間経過し土砂などを被り劣化・変色した発泡スチロール片のサンプリングは回避した。
- 7) 海水を含んだり、貝・海藻類やタール状廃油等の異物で覆われている発泡スチロール片のサンプリングは回避した。
- 8) サンプリングする発泡スチロール片の1サンプル量は、40cm四方ポリ袋に入る程度とした。
- 9) 海岸長や発泡スチロール片の漂着状況を適宜考慮して、対象海岸によっては複数個のサンプルを採取した。

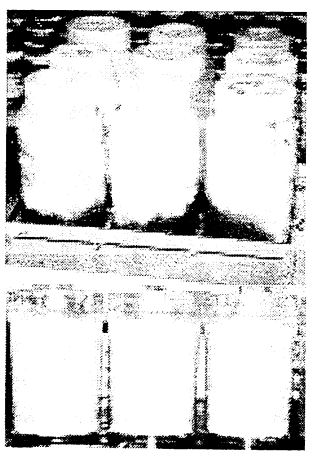
表1 発泡スチロール片・海浜砂の採取海岸域と海岸数(2008年調査)

調査海岸域	調査海岸数	採取サンプル数	
		発泡スチロール片	海浜砂
沖縄県本島	1	1	1
沖縄県久高島	1	1	1
沖縄県渡名喜島	2	2	2
沖縄県石垣島	7	13	3
沖縄県竹富島	1	1	1
沖縄県黒島	2	2	2
沖縄県西表島	10	20	8
沖縄県波照間島	3	3	2
沖縄県与那国島	8	12	5
広島県宮島	3	3	3
新潟県沿岸・佐渡島	7	10	3
千葉県東京湾沿岸	3	10	6
神奈川県三浦半島沿岸	35	43	36
宮城県仙台市沿岸	1	3	2
東京都硫黄島	6	7	6
米国ハワイ島	3	3	3
総計	90	134	84

6. 溶出試験と元素成分分析

(1) 発泡スチロール片と海浜砂の溶出試験

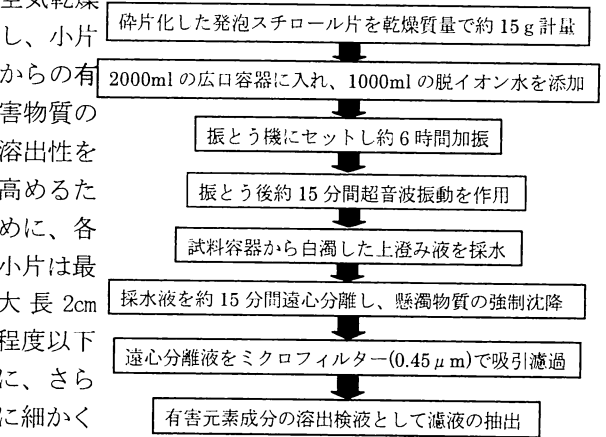
採取した漂着発泡スチロール片が海域を漂流浮遊し、海岸に打ち上がる間に吸着・付着したと推察される有害物質である重金属類等の元素成分を分析評価するために、発泡スチロール片の採取サンプルからの溶出試験を試みた。発泡スチロール片の溶出試験方法は基準化



されていないので、地盤工学会での「土の溶出試験方法」を参考として、その方法に準拠して実施した⁷⁾。

溶出試験に先立ち、採取発泡スチロール片はサンプル袋ごとに

表2 発泡スチロール片の溶出検液の抽出フロー



割って碎片化しよく混合した。溶出検液の作製では、乾燥質量で約15gの細かく碎片化した発泡スチロールを広口プラスチック容器(容積2000ml)に入れ、1000mlの脱イオン水を添加(固液比は3:200)して6時間振とう後、さらに超音波を約15分作用させ、多孔質な発泡スチロールからの溶出促進を図った。発泡スチロール懸濁液を採水し遠心分離後、0.45 μm のマイクロフィルターで吸引濾過し溶出検液を抽出した(写真9)。なお表2に溶出試験の流れを示している。

一方、海浜砂の場合は、地盤工学会の試験法に準じ、2mmふるい通過分の土粒子50gに500mlの脱イオン水を添加(固液比は1:10)して、溶出検液を抽出している。発泡スチロール片と海浜砂で、固液比を同一に設定できなかった理由は、前者のサンプルはかさばり、容積がかなり大きくなるため、実験上、器具・装置に制約が生じたためである。

漂着発泡スチロール片と海浜砂から抽出した溶出検液に溶存している重金属類等の元素成分の定量分析には、ファーンズ型原子吸分光光度計(島津製AA-6650型)を使用した原子吸分光法によって実施した。分析対象とした重金属類等の元素成分は、**As、Pb、Cr、Cd、Cu、Zn、Al、Ni、Sn、Mn**の10種類で、水質・土壌汚染に関する環境基準に規定されているものを主体に、いずれも人を含め生態系などの自然環境に悪影響を及ぼすとされる有害な元素成分である。なお重金属類等の各元素成分の溶出量は「 $\mu\text{g/l}$ 」(ppbオーダー)の単位で検出されるが、溶出量は発泡スチロール片(または海浜砂)の単位乾燥質量(1kg)当りの溶出量(μg)に換算して表示することから、ここでは溶出量の単位は「 $\mu\text{g/kg}$ 」として統一して表示することとした。

7. 分析結果と考察

(2) 原子吸分光光度法による元素成分分析

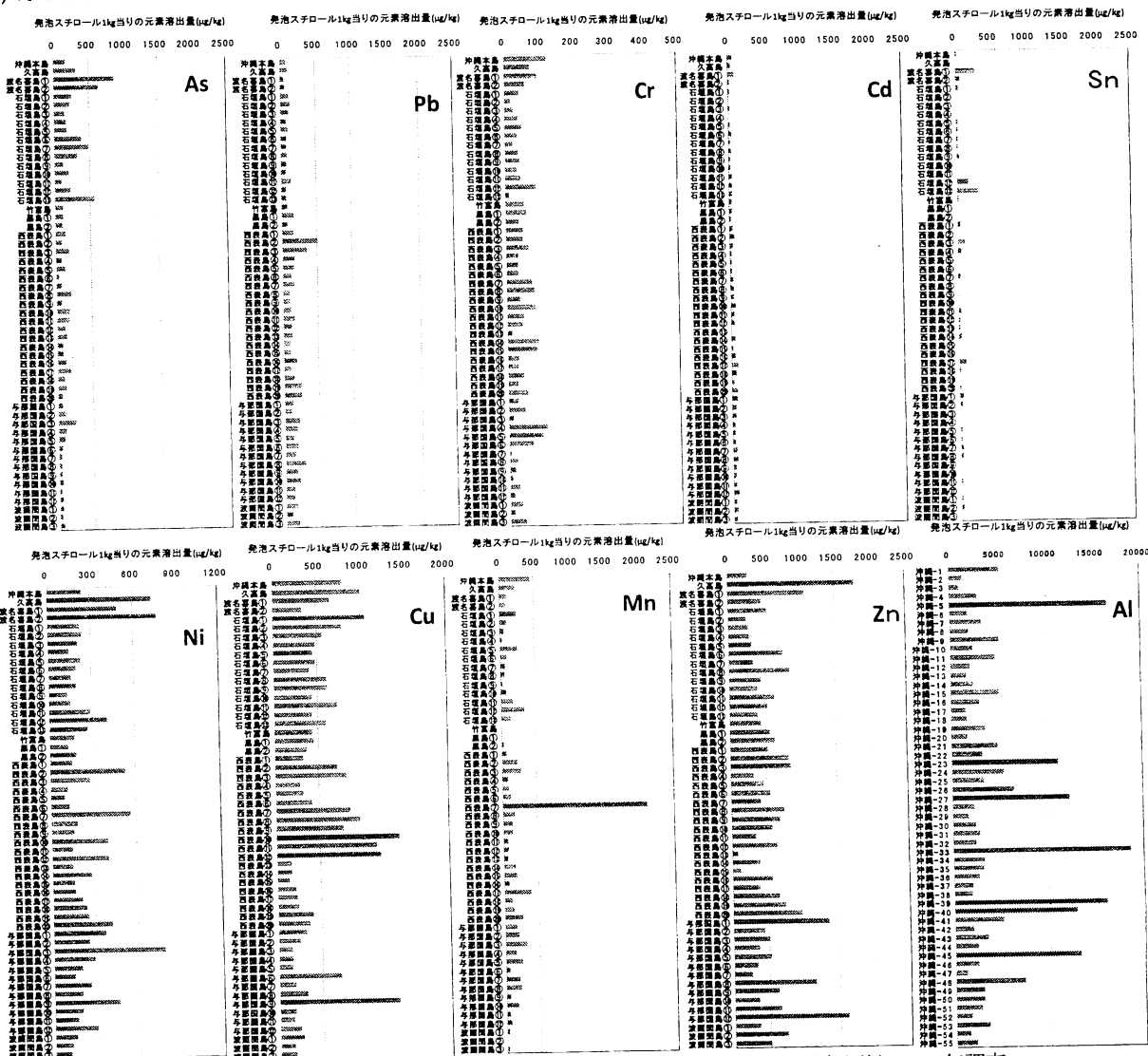


図9 琉球列島で採取した発泡スチロール片からの重金属類等の溶出状況(2008年調査)

(1) 琉球列島9島の沿岸

琉球列島の最西端諸島である八重山諸島を主体に、9島(沖縄本島、久高島、渡名喜島、石垣島、竹富島、黒島、西表島、波照間島、与那国島)35海岸で採取した漂着発泡スチロール片の55サンプルについて、10元素成分の溶出量に関する分析結果を図9に示している。先述したように、各元素成分の溶出量($\mu\text{g/kg}$)は、漂着発泡スチロール片1kg(乾燥質量)当りからの溶出量(μg)として表示している。

発泡スチロールはポリスチレンビーズを発泡し硬化させた素材で、基本的には炭素(C)と水素(H)からなる炭化水素の化学構造を有しているはずである。にも拘らず分析結果では、いずれの元素成分においてもその溶出性が確認される。各元素成分において、漂着発泡スチロール片を採取した島や海岸、また同一海岸でもサンプル間によって、溶出量はかなり異なる場合のあることがわかる。個々の発泡スチロール片の詳細な漂流海域や漂着経路・期間など、追跡究明することが難しい複雑な要因によって、島間や海岸域での溶出する元素成分の特異性や溶出量の傾向を明確に捉えることは難しい。しかし各元素成分で全サンプルの平均値を算定し、10元素成分間での溶出量を比較すると、東シナ海・太平洋に囲まれた琉球列島での本結果では、概ね下記に示す傾向が認められる。

$$\text{Al}(4389.6) > \text{Zn}(581.5) > \text{Cu}(506.6) > \text{Ni}(265.7) > \text{Mn}(168.5) \cdot \text{As}(164.7) > \text{Pb}(138.7) > \text{Cr}(46.7) \cdot \text{Cd}(41.6) \cdot \text{Sn}(35.7) \quad (1)$$

但し()内の数値は全平均値で単位は「 $\mu\text{g/kg}$ 」

溶出量の最も高かった元素成分はAlで、4000 $\mu\text{g/kg}$ 台の値が検出された。ZnとCuの溶出量も比較的高く500 $\mu\text{g/kg}$ 台の値であった。次いでNiが200 $\mu\text{g/kg}$ 台、Mn、As、Pbは100 $\mu\text{g/kg}$ 台であった。Cr、Cd、Snは50 $\mu\text{g/kg}$ 以下でほとんど非検出に近いサンプルが多かった。このように溶出量的には差異はあるが、各種の元素成分が検出されることから、海岸に打ち上がった漂着発泡スチロール片から溶出する各元素成分は、海域で漂流浮遊している過程に、海水から発泡スチロール片の細孔質な組織構造に取り込まれ吸着・付着した可能性が高いと推察される。しかし打ち上がった後、他の漂着ゴミ(大半は化学物質製品)の劣化・分解や接触・混在の影響などによって吸

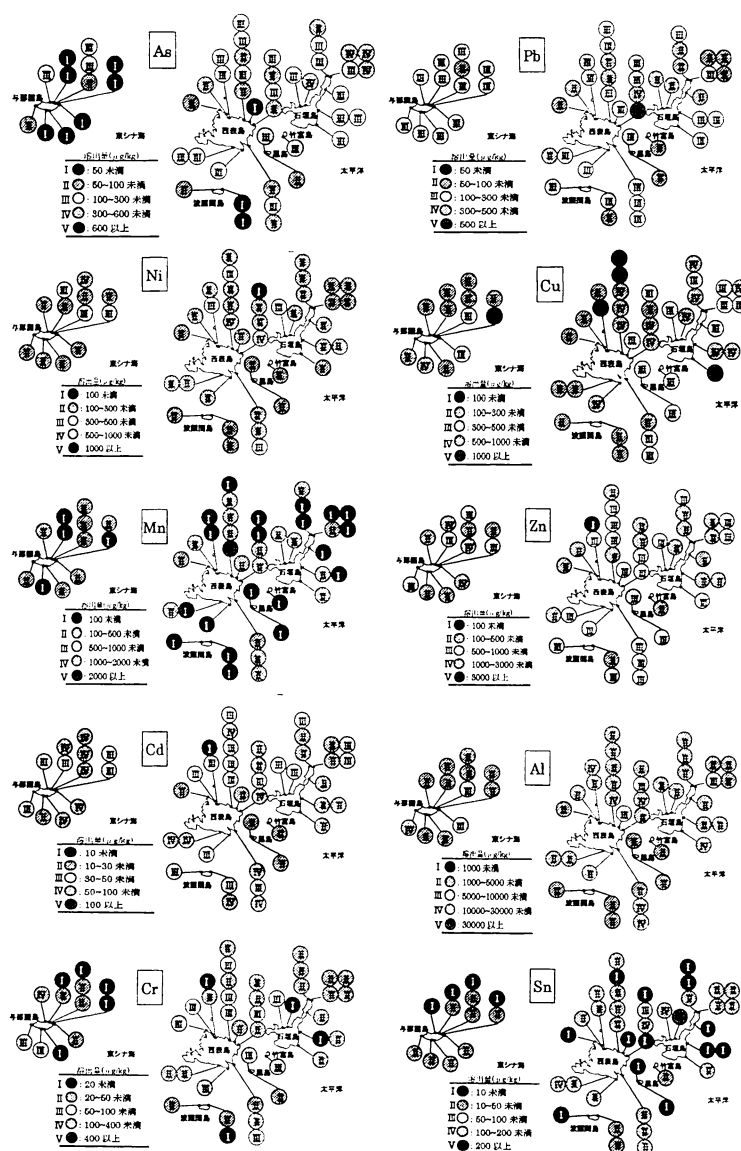


図10 八重山諸島の海岸地点での重金属類等の溶出量マップ表示

着することも考えられる。現状では、漂着発泡スチロール片から溶出する各元素成分の詳細な発生源や供給源について言及することは難しい。

しかしそこで、八重山諸島の分析結果について、各元素成分の溶出量を5段階に濃度区分し、漂着発泡スチロール片のサンプルごとに、採取した海岸地点上にマップ表示してみたのが図10である。このように溶出量をマップ表示することで、島間や海岸域での溶出元素成分の特徴や溶出量の傾向を多少捉えることができる。(1)式での溶出量の平均値が50 $\mu\text{g/kg}$ 以下のほとんどのサンプルが非検出に近かったCr、Cd、Snを除いた7元素成分に着目する。まずIVランク以上の高い溶出量が検出された元素成分に注目すると、石垣島ではCu(7サンプル)、As(4サンプル)、Al(1サンプル)、西表島ではNi(2サンプル)、Cu(9サンプル)、Mn(1サンプル)、Al(5サンプル)、Pb(1サンプル)、与那国島ではNi(1サンプル)、Cu(2サンプル)、Al(1サンプル)、Zn(3サンプル)で、竹富島、黒島、

波照間島では7元素成分いずれもIVランク以上の溶出量の検出されるサンプルはなかった。同一海岸地点でもサンプル間で溶出量がかかなり異なる元素成分もあるが、各元素成分でIVランク以上の高い溶出量の検出されたサンプルの場合には、石垣島、西表島、与那国島のいずれの島においても、主に島の北部から東部の海岸域に掛けて採取したサンプルに多く確認された。特に、Cuの場合にはそのような傾向が強い。なお琉球列島での長年の漂着ゴミ調査では、やはり八重山諸島での近隣アジア諸国からの海洋越境ゴミの漂着が深刻で、殊に石垣島、西表島、与那国島のいずれの島でも北部～東部に掛けての海岸域では、大量の漂着ゴミに覆われ廃棄場と化した海岸が多く⁹⁾、上述した漂着発泡スチロール片からの元素成分の高い溶出量が検出されるサンプルが多いことと因果関係があるように推察される。

このような漂着発泡スチロール片からの各元素成分の溶出傾向や溶出量の結果から判断すると、直ちに生態系への影響や海洋・海岸汚染への影響について論じることは難しいが、海岸に打ち上がった漂着発泡スチロール片は有害物質を吸着・付着して運搬・拡散・移動させる「運びや(キャリア)」となる懸念性が科学的に指摘される。そのため、当然、広域的な視点からの検証が求められる。次節では首都圏に位置する東京湾・相模湾沿岸の関東沿岸域での結果例を提示し論じる。

堤等の人工海岸域が大半を占めているが、湾口付近や相模湾側にはまだ希少な砂浜や岩礁海岸などの自然海岸が残存している。漂着ゴミ問題が社会的に国民の大きな関心事となった近年では、毎年複数回、清掃活動の実施される海岸が多くなっている。しかし数年前までは湾内での養殖漁業活動などで発生する発泡スチロールブイやその破片群等の漂着ゴミが山のように打ち上がった海岸をよく見かけた(写真10)。そこで2008年の調査では、東京湾・相模湾に面する神奈川県・千葉県の間東沿岸域の53海岸(神奈川県43海岸、千葉県10海岸)で漂着発泡スチロール片を採取し、分析を実施した。

ここでは考察の便宜上、調査海岸域(図7参照)を東京湾岸の東京湾房総半島側(千葉-1～千葉-10)と東京湾三浦半島側(神奈-1～神奈-32)及び太平洋岸の相模湾三浦半島側(神奈-33～神奈-43)の3区域に区分して分析データを提示する。各海岸で採取した漂着発泡スチロール片に関する各元素成分の溶出状況を図11に示している。溶出量は海岸地点と元素成分の種類によってかなり異なっているが、当



写真10 数年前は東京湾沿岸でも大量漂着

(2) 関東沿岸域の東京湾・相模湾沿岸

首都圏を背に地勢する東京湾・相模湾沿岸には経済・生活活動の極めて活発な多くの人口密集大都市を流下する荒川、江戸川、多摩川、鶴見川、相模川、酒匂川等の多くの一級河川の河口が広がり、両湾に注いでいる現状がある。また東京湾岸は埋め立て護岸、垂直コンクリート護岸、消波工ブロック

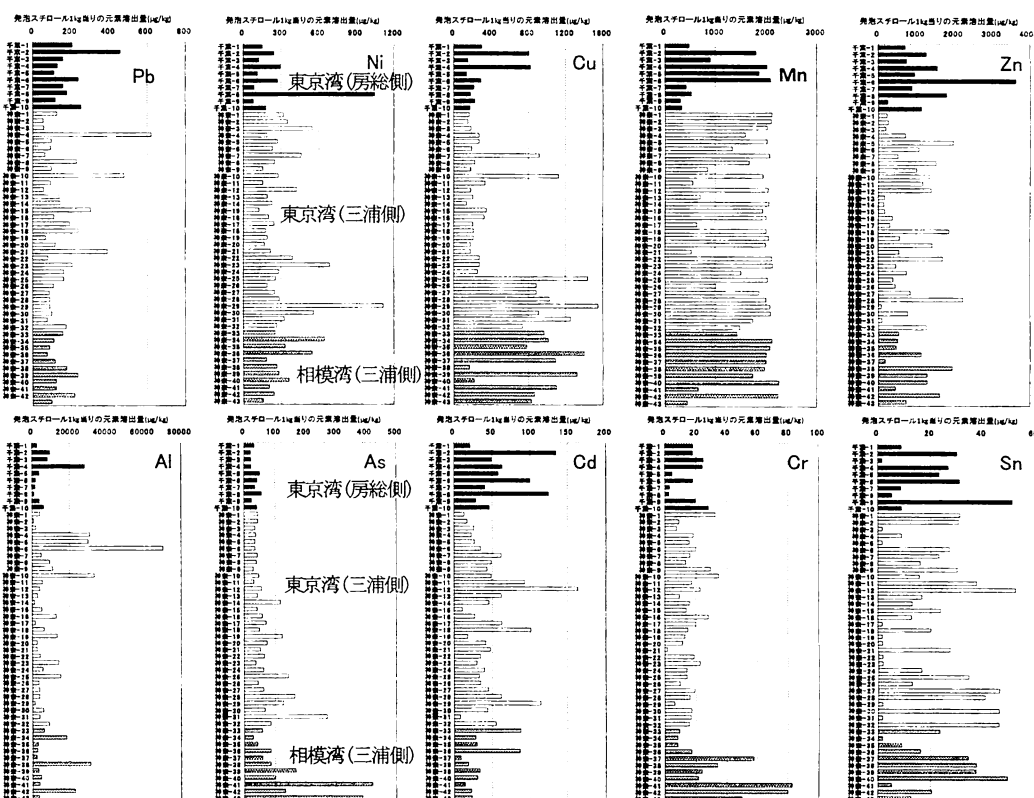


図11 関東沿岸域の東京湾・相模湾沿岸で採取した発泡スチロール片からの重金属類等の溶出状況



図 12(a)神奈川県三浦半島沿岸の重金属類等の溶出量マップ表示

調査海岸域でもやはり、漂着発泡スチロール片からの各元素成分の溶出性が確認される。

総じて溶出量の高い元素成分は **Mn**、**Zn**、**Cu**、**Al**、**Ni** であった。最も高い溶出量を示した元素成分はやはり **Al** で、**Mn** と **Cu** の溶出量も非常に高かった。**Pb**、**Cr**、**As**、**Cd**、**Sn** は前者の元素成分に比較して溶出量はかなり低かったが、中には比較的高いサンプルもあり、溶出量に差異が認められた。

ちなみに土壤汚染対策法での土壤環境基準に規定されている **Pb**、**Cr**(基準では六価クロム)、**As**、**Cd** の場合について、溶出量の目安と

して基準値と比較してみる。漂着発泡スチロール片の場合には、土壤汚染対策法での土試料の溶出試験法と異なっているので、直接的な対比は難しいが、基準値は「mg/l」単位で表示されているので、それを「 $\mu\text{g/kg}$ 」に換算して比較してみる。**Pb** の基準値は $100\mu\text{g/kg}$ (0.01mg/l) であり、これを超えるものは 33 サンプルあった。**Cr** の基準値は $500\mu\text{g/kg}$ (0.05mg/l) であるが、いずれも $100\mu\text{g/kg}$ 以下で基準を超えるサンプルは検出されなかった。**Cd** と **As** の基準値は $100\mu\text{g/kg}$ (0.01mg/l) であるが、この値を超えるものは、**Cd** で 6 サンプル、**As** で 11 サンプル検出された。

そこで漂着発泡スチロール片からの溶出量の海岸域的特徴をみるために、溶出量を5段階に濃度区分した代表的な元素成分のマップ表示を図12(a)と12(b)に示す。分析

した10元素成分の結果(東京湾房総半島側は代表例3元素成分提示)では、海岸地点ごとのばらつきはあるが、3区域での海岸域的な傾向を概説すると、**Cu**、**Mn**、**Al**、**As** は東京湾三浦半島側と相模湾三浦半島側、**Zn** と **Cd** は東京湾房総半島側の漂着発泡スチロール片からの溶出性が高い傾向にあることがわかった。他の**Ni**、**Cr**、**Pb**、**Sn** の溶出性には海岸域的な相違はほとんど認められなかった。そこで、3区域での溶出性に関する海岸域的傾向をより明瞭にするために、3区域での平均値を比較したのが図13である。各元素成分の溶出性に海岸域的傾向のあることが理解される。このような溶出性の相違に関する詳細な要因について言及することは難しいが、大都市の海岸域では、海岸域が面する海域、河川河口の位置、海岸域背後や近郊の土地利用・活用などの相違の影響が大きいも

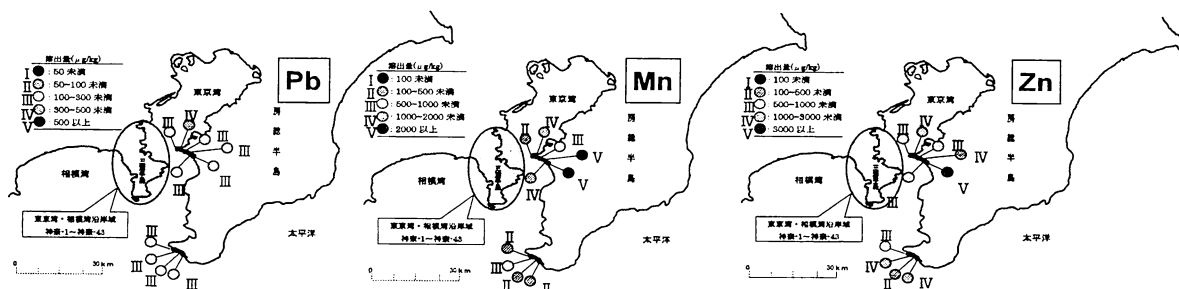


図 12(b)千葉県房総半島沿岸の重金属類等の溶出量マップ表示(3 元素成分、他は省略)

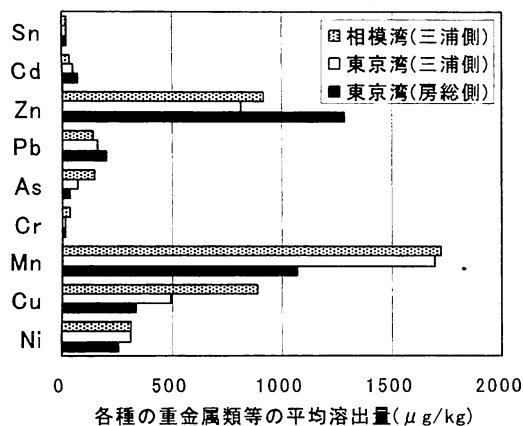
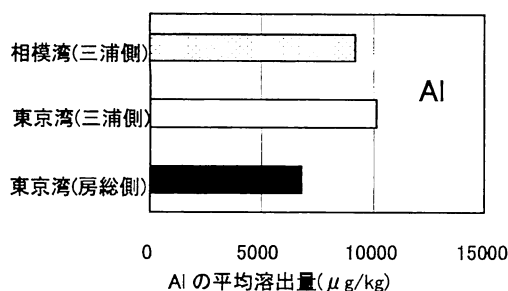


図 13 東京湾・相模湾 3 区域での平均溶出量の比較
のと推察される。なお3区域での各元素成分の平均溶出量は下記のような大小関係で表示される。

東京湾房総半島側

$$Al > Zn > Mn > Cu > Ni > Pb > Cd > As > Sn > Cr \quad (2)$$

東京湾三浦半島側

$$Al > Mn > Zn > Cu > Ni > Pb > As > Cd > Sn > Cr \quad (3)$$

相模湾三浦半島側

$$Al > Mn > Zn > Cu > Ni > As > Pb > Cr > Cd > Sn \quad (4)$$

また各元素成分において全サンプル(53サンプル)の平均値を求めると、関東沿岸域の東京湾・相模湾沿岸での漂着発泡スチロール片からの平均溶出量には、概ね下記の傾向が認められる。

$$Al(9921.8) > Mn(1699.7) > Zn(838.2) > Cu(593.2) > Ni(311.8) > Pb(154.7) > As(88.7) > Cd(44.4) > Cr(21.7) \cdot Sn(20.8) \quad (5)$$

但し()内の数値は全平均値で単位は「μg/kg」

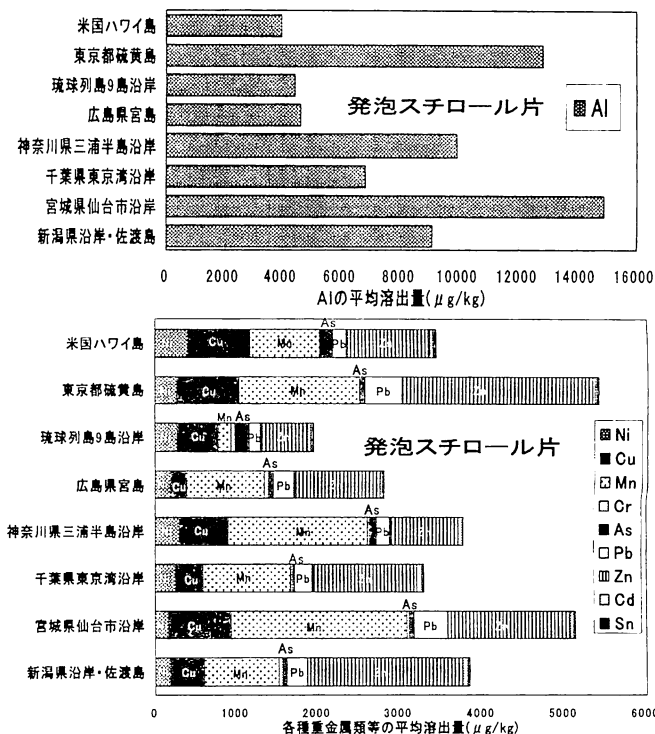


図 14 各調査海岸域での重金属類等の平均溶出量の比較

(3) 調査海岸域間での比較検証

先述したように、琉球列島9島の沿岸と関東沿岸域の東京湾・相模湾沿岸を代表事例として取り上げ、漂着発泡スチロール片からの各種元素成分の溶出性について、その海岸の傾向や溶出元素の特徴などをマップ表示して詳述した。ここではさらに、広域的に海域・海岸域の特徴や傾向を捉えるために、上述の琉球列島と関東沿岸域に加え、瀬戸内海岸域の広島県宮島、日本海岸域の新潟県沿岸・佐渡島、太平洋岸域の宮城県仙台市沿岸、太平洋上の東京都小笠原諸島硫黄島と米国ハワイ島での分析結果を並記して、調査海岸域間(図3・図5参照)での比較検証を試みる。各調査海岸域での海岸地点のマップ表示は省略し、10元素成分の溶出量は平均値を用いて議論する(図14)。なお関東沿岸域の東京湾・相模湾沿岸は神奈川県三浦半島沿岸(相模湾三浦半島側と東京湾三浦半島側)と千葉県東京湾沿岸(千葉県房総半島側)の2海岸域に区分している。

図14より、いずれの調査海岸域で採取した漂着発泡スチロール片からも各元素成分の溶出性が確認されるが、各元素成分の平均溶出量は、調査海岸域によってかなり異なっていることがわかる。特に琉球列島9島の調査海岸域では、元素成分の溶出性は低く、このような低溶出性の傾向は、分析した10元素成分において総じて認められる。これは琉球列島の海域(東シナ海、西太平洋など)を漂流浮遊している間の各元素成分の吸着・付着が低いこと、あるいは漂流浮遊中に一端吸着された各元素成分の溶出が促進され、海岸域に打ち上がったことも考えられる。これに対して、関東沿岸域の東京湾・相模湾沿岸(神奈川県三浦半島沿岸・千葉県東京湾沿岸)はじめ、太平洋岸に面した宮城県仙台市沿岸や、太平洋上の東京都硫黄島や米国ハワイ島での各元素成分の溶出量は、かなり高いのがわかる。硫黄島とハワイ島の場合は、現在も時折海底噴火を繰り返した大量の噴煙を発する活動状況にある火山島で、噴出降下物質などからの影響が反映されている可能性も高い。瀬戸内海岸域の広島県宮島では琉球列島9島沿岸に次いで比較的溶出量は低い。日本海岸の新潟県沿岸・佐渡島での溶出量は、太平洋岸の調査海岸に匹敵する溶出量を示している。分析した10元素成分の中でも、特に、**Al**、**Zn**、**Cu**、**Mn**、**Pb**、**Ni**の溶出量が、各調査海岸域で総じて高い傾向が窺われる。

高い溶出量が検出された主要な元素成分において、調査海岸域間での平均溶出量の大小関係(上位4海岸域まで)には、概ね下記の傾向が認められた。

<Al>

①宮城県仙台市沿岸(14881.8)>②東京都硫黄島(12834.0)>③神奈川県三浦半島沿岸(9921.8)>④新潟県沿岸・佐渡島(9077.6) (6)

<Zn>

①東京都硫黄島(2337.9)>②新潟県沿岸・佐渡島(1896.7)>③宮城県仙台市沿岸(1504.2)>④千葉県東京湾沿岸(1284.8) (7)

<Mn>

①宮城県仙台市沿岸(2138.3)>②神奈川県三浦半島沿岸(1699.7)>③東京都硫黄島(1465.4)>④千葉県東京湾沿岸(1072.4) (8)

<Cu>

①宮城県仙台市沿岸(780.8)>②米国ハワイ島(765.9)>③東京都硫黄島(763.8)>④神奈川県三浦半島沿岸(593.2)

<Pb>

①東京都硫黄島(454.3)>②宮城県仙台市沿岸(403.5)>③広島県宮島(247.3)>④新潟県沿岸・佐渡島(245.7) (9)

<Ni>

①米国ハワイ島(405.1)>②神奈川県三浦半島沿岸(311.8)

>③東京都硫黄島(267.0)>④琉球列島9島(265.7) (10)

但し()内の数値は全平均値で単位は「 $\mu\text{g/kg}$ 」

以上のこのような分析結果から、漂着発泡スチロール片からの各元素成分の溶出性は、発泡スチロール片が打ち上がる海域・海岸域や漂流・漂着期間、さらには近傍の地勢環境等の複雑な要因によって影響を受け、海岸域にかなり異なることが明らかとなった。今後さらに、全国的に綿密な地域調査が要求される。

(4) 海浜砂の溶出性との比較検証

海浜砂からの溶出量の評価は、漂着発泡スチロール片からの溶出量との比較において、自然界での各元素成分の溶出量の目安とするもので、バックグランド値的な指標値として活用するためである。そのため海浜砂のサンプリングでは、各調査海岸域において、浜を代表する地点で、しかも漂着ゴミの影響の少ない波打ち際近くでクリーンな状態の海浜砂を1~3サンプル採取している。

このように採取した海浜砂についての各元素成分の溶出性を、調査海岸域間で比較したのが図15である。各元素成分の溶出量は、各調査海岸域での平均値として表示している。海浜砂の場合にも、調査海岸域や元素成分の種類によって溶出量にはかなりの相違は認められるが、**Cu**、**Mn**、**Zn**、**Al**、**As**の溶出量が比較的高い海岸域が多

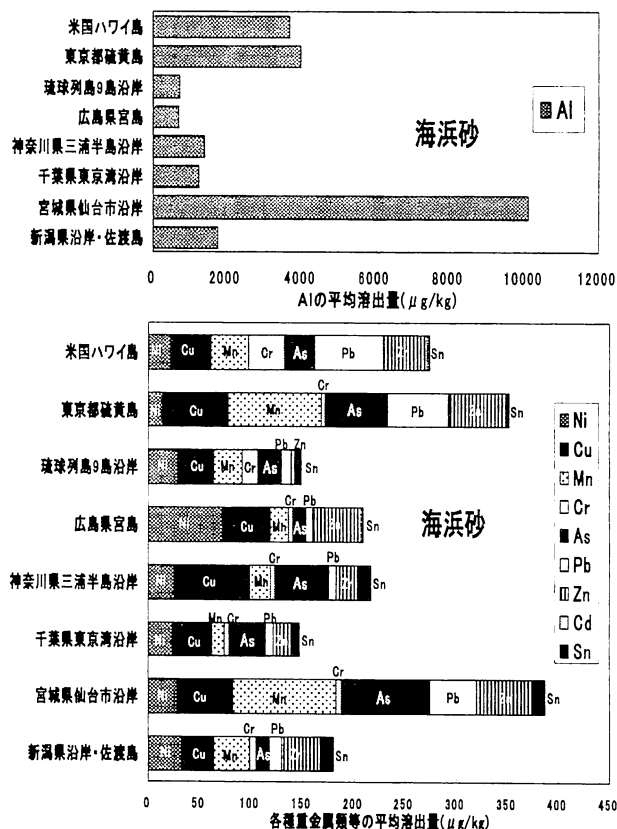


図 15 各調査海岸域での海浜砂からの平均溶出量の比較

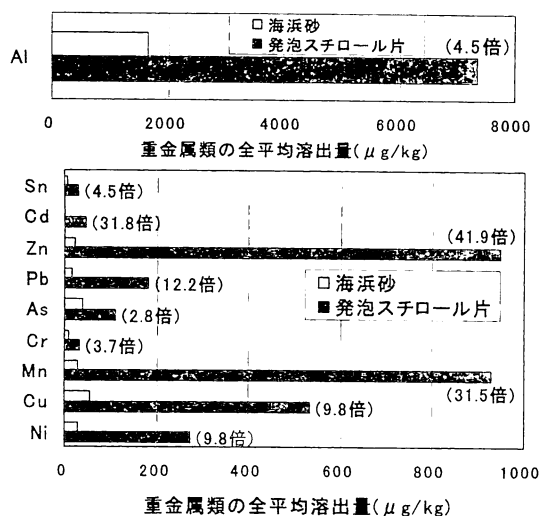


図 16 発泡スチロール片と海浜砂の全平均溶出量の比較

い。東京都硫黄島や米国ハワイ島は活火山島で、火山由来の黒い海浜砂であることから、**Pb**の溶出量も高い。琉球列島の海浜砂はサンゴ白砂であることから、総じて金属元素の溶出量の低いことが分かる。海浜砂の溶出量にも人為的な要因によるものも若干含まれているものと思われるが、概ね自然界由来の溶出量と見なすことができる。この各調査海岸域での海浜砂からの溶出量の結果を、前節で記述した(図14参照)漂着発泡スチロール片からの溶出量と比較すると、各元素成分において概ね1/10～1/20程度であることがわかる。そこで図16では全調査海岸域での海浜砂と漂着発泡スチロール片からの溶出量の全平均値を求め、10元素成分について比較している。なお同図中には、漂着発泡スチロール片の海浜砂に対する溶出量の比率を明示している。この結果からも明らかに、漂着発泡スチロール片からの各元素成分の溶出量は高く3～10倍のものが多く、中には**Zn**の41.9倍、**Cd**の31.8倍、**Mn**の31.5倍、**Pb**の12.2倍と、10倍を超える溶出量を示す元素成分も検出される。このような状況から判断すると漂着発泡スチロール片からの溶出量の起源は、人為的な要因によっているものと推察される。

8. まとめ

広域的な調査海岸域を設定して、漂着発泡スチロール片が有害物質を吸着・付着して運搬・拡散・移動する「運びや(キャリア)」としての危険性について科学的に考察を加えた。主要な結論を下記に要約する。

1) 対象とした広域8箇所の調査海岸域でサンプリングした漂着発泡スチロール片134サンプルについての10元素成分に関する溶出量の分析評価では、分析した全ての漂着発泡スチロール片から生態系に好ましくないとさ

れる各種の元素成分が検出され、漂着発泡スチロール片が有害物質の危険性を孕んだ漂着ゴミであることがわかった。

2) 漂着発泡スチロール片からの有害元素の溶出性は、調査海岸域や有害元素の種類によって異なっており、特に、**Al**、**Mn**、**Zn**、**Cu**、**Ni**の溶出性が、総じて高い傾向にあった。

3) 漂着発泡スチロール片からの各種の有害元素の溶出性は分析した10元素成分において、自然界に由来するバックグラウンド値的な指標値の目安となる同一海岸から採取した海浜砂からのものに比較して、総じて極めて高く、10～20倍の溶出量を示すことから、その供給起源は海洋・沿岸域への人為的負荷の影響が反映されていたものと判断される。

4) 漂着発泡スチロール片は漂流浮遊過程で有害元素を吸着・付着するのみならず、溶出する可能性も懸念され、海洋・海岸汚染を齎す危険因子となる可能性が高い。即ち、大量に海岸に打ち上がり白帯化汚染を引き起こしている漂着発泡スチロール片は有害物質を運搬・拡散・移動させる「運びや(キャリア)」としての懸念性がクローズアップされる。

以上のことから、直ちに海浜生態系や海域環境への汚染問題が顕在化するとは言い難いが、全国的に大量漂着する発泡スチロール片からの有害物質の溶出性の評価は、海洋(海水)・海浜汚染のパラメータ的指標となる可能性がある。今後、さらに広域的に調査海岸域を拡大し、全国的に科学的評価を試みると共に、他の吸着・溶出する有害物質の分析評価を試みる事が重要となる。

参考文献

- 1) 山口晴幸：海浜地盤汚染(1)～漂着ゴミと重金属類～, 地盤工学会, 第43回地盤工学研究発表会No.1080, pp.2159-2160, 2008.
- 2) 山口晴幸：沖縄漂着～中国ゴミ13倍・10年間「垂れ流し」浮き彫り～, 産経新聞, 平成20年2月14日発行, 2008.
- 3) 山口晴幸：沖縄における深刻化する漂流・漂着ごみの実態, 環境新聞社専門誌「INDUST」, 第23巻第5号通巻247号, pp.58-64, 2008.
- 4) 岡山伸吾, 山口晴幸：漂着ゴミと有害物質～西表島の海岸線～, 地盤工学会第45回地盤工学研究発表会投稿中, 2010.
- 5) 山口晴幸, 岡山伸吾：沖縄西表島マングローブ湿地の漂着ゴミ汚染, 地盤工学会第45回地盤工学研究発表会投稿中, 2010.
- 6) 山口晴幸, 岡山伸吾：漂着ゴミと有害物質～発泡スチロール片～, 土木学会第65回年次学術講演会投稿中, 2010.
- 7) 地盤工学会編：土質試験の方法と解説, 「化学試験」, 1990.
- 8) 山口晴幸：海洋越境ごみに埋もれる宝の島「沖縄」, 月刊「廃棄物」, Vol.36, No.466, 日報アイ・ビー, pp.74～80, 2010.