地質ニュース587号，26－33頁，2003年7月
Chishitsu News no.587, p.26－33, July, 2003

土壌・地質汚染評価基本図「5万分の1姉崎」の概要

丸茂　克美[1)]・竹内　美緒[2)]・江橋　俊臣[3)]・楡井　久[4)]

1. はじめに

土壌汚染対策法に基づく土壌汚染状況調査において，砒素や鉛などの汚染が見つかった場合，汚染が人為的なものなのか，あるいは自然由来の汚染なのかを判断する必要がある．なぜならば，平成14年1月の中央環境審議会の「今後の土壌環境保全対策の在り方について(答申)」において，「自然的原因により有害物質が含まれる土壌については，人の活動に伴って生じる土壌汚染ではなく，従って環境基本法で定める公害とは言えないことから，この制度(土壌汚染対策法のこと)の対象とはせず，別途検討されるべき課題であると考える」とされているためである．

環境省のホームページによると，砒素や鉛などの重金属による土壌汚染の原因調査の結果，295件のうち，3件が自然由来の汚染であると判明した．また自然由来の汚染であると判明された場合でも，恒久対策を講じた事例がある．

このように自然由来の汚染と判定される場合でも，健康に影響がある場合があるので，自然由来の汚染地は適切に管理されることが望ましい．従って，土壌や堆積物中の砒素や鉛などの有害物質の含有量や溶出量に関するバックグラウンド値に関する情報を整備することが必要である．

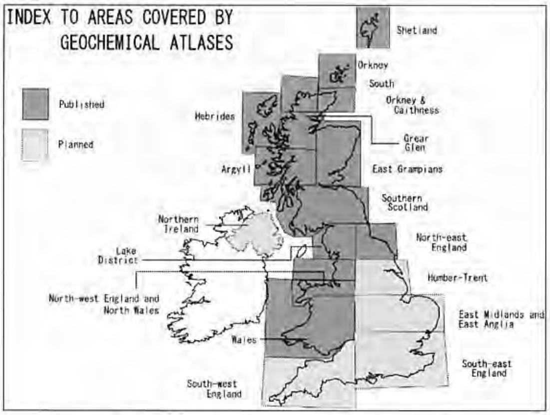
土壌・地質汚染評価基本図「5万分の1姉崎」は，土壌や堆積物中の砒素や鉛などの有害物質の含有量や溶出量に関するバックグラウンド値に関する情報を，5万分の1地質図幅「姉崎」に加えて整備したものである．

この報告では，土壌・地質汚染評価基本図「5万分の1姉崎」を作成するに当たって参考とした英国地質調査所のG-BASE programmeの概要を紹介するとともに，土壌・地質汚染評価基本図「5万分の1姉崎」の特徴について概要を述べる．

2. 英国地質調査所のG-BASE programme

土壌・地質汚染評価基本図の作成にあたって，最初に実施された作業は，土壌環境保全に関する法整備が進んでいる欧米における，地球化学図や土壌・地質汚染評価基本図製作事業に関する知見を得ることであった．このうち，特に参考になる事業は，我が国と同様に国土が狭く，かつ古くから工業化が進んで土壌汚染を体験している英国の，Geochemical Baseline Survey of the Environment (G-BASE programme)である．

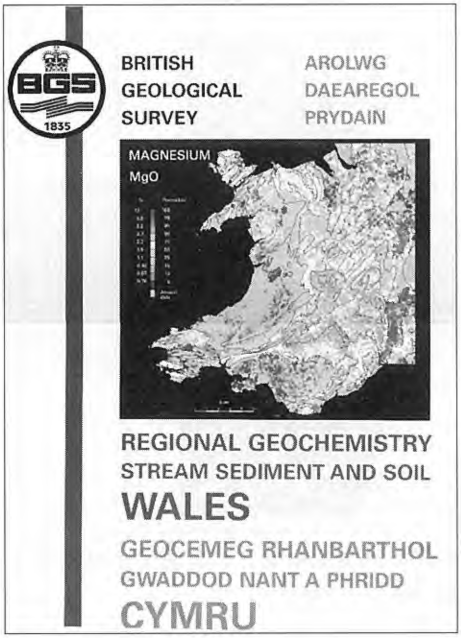
英国地質調査所(British Geological Survey)は，1971年から鉱物資源探査事業の一環として，



第1図　英国地質調査所の地球化学図．

1) 産総研 海洋資源環境研究部門
2) 産総研 地圏資源環境研究部門
3) ドリコ株式会社(産総研 海洋資源環境研究部門技術研修生)
4) 茨城大学広域水圏科学教育研究センター

キーワード：土壌汚染対策法，地球化学図，英国地質調査所，特定有害物質，蛍光X線分析法，含有量試験，溶出量試験，上総層群，関東ローム

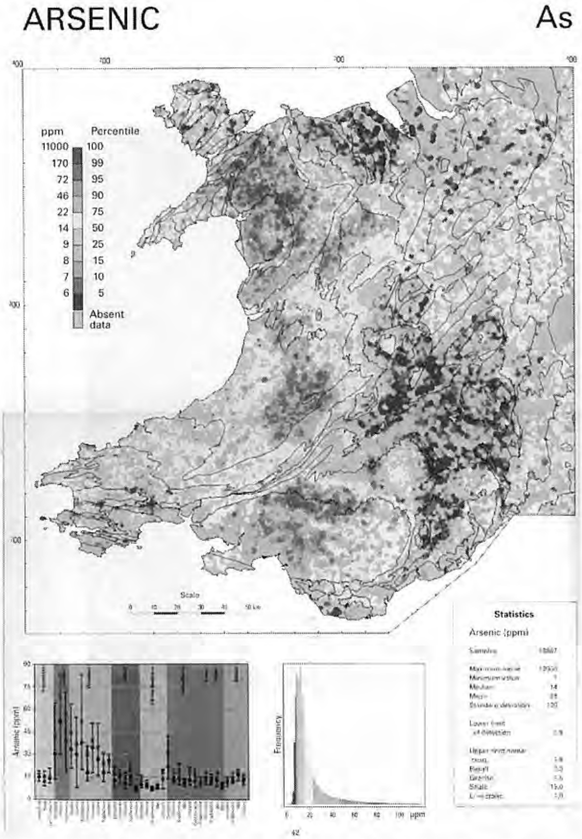


第2図　英国地質調査所発行の地球化学図の表紙.

開発の遅れていた北部地域（Shetland, Orkneyなど）の河川堆積物（stream sediment）を分析し，そのデータを地球化学図（Geochemical Atlas）としてまとめ，1978年から2000年までに14巻を出版した（第1図）．このうち最初の7巻は，河川堆積物試料の採取地点を250万分の1縮尺の地質図にプロットした，point-source geochemical dataであり，次の7巻はコンピュータ処理により，各元素濃度を色分けした地球化学図（英国地質調査所ではDigital geochemical imageryと表現している）である．

この事業の目的は，時代の変化とともに鉱物資源探査から環境評価に移行していった．すなわち初期の事業では，後背地にある金属鉱床・鉱兆を発見するための河川堆積物の分析が主体であったが，2000年に出版された最新版であるRegional geochemistry of Wales and part of west-central England:stream sediment and soil（以下Wales地方の地球化学図と略す．第2図，British Geological Survey, 2000）では，市街化地域の土壌汚染評価のためのバックグラウンドデータを整備することを目的として土壌の分析も実施している．

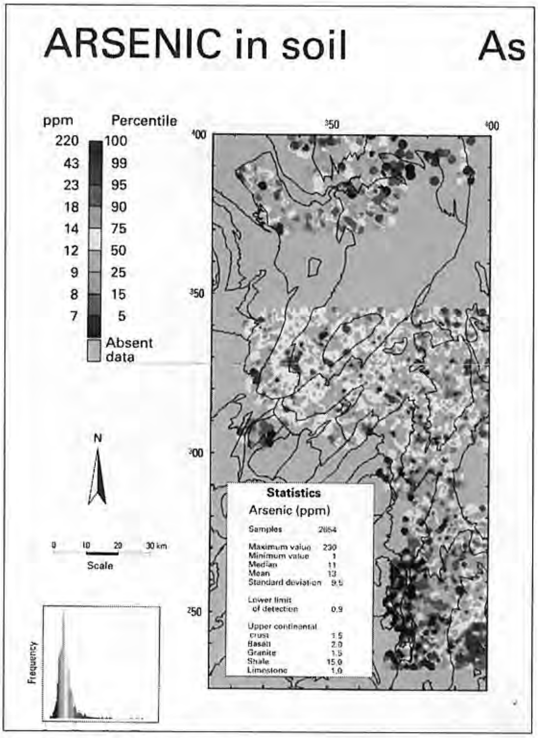
Wales地方の地球化学図における河川堆積物の分析は，東西，南北ともに230kmあるWales地方全域（ただし陸地はこの区画の半分程度）とEngland の一部の地域を対象として，1988年～1994年の期間実施された．試料採取数は1万9千点にも及び，1km²に0.7点という割合で試料採取が実施され，その成果として約90万分の1の縮尺の河川堆積物地球化学図が作成された（第3図）．



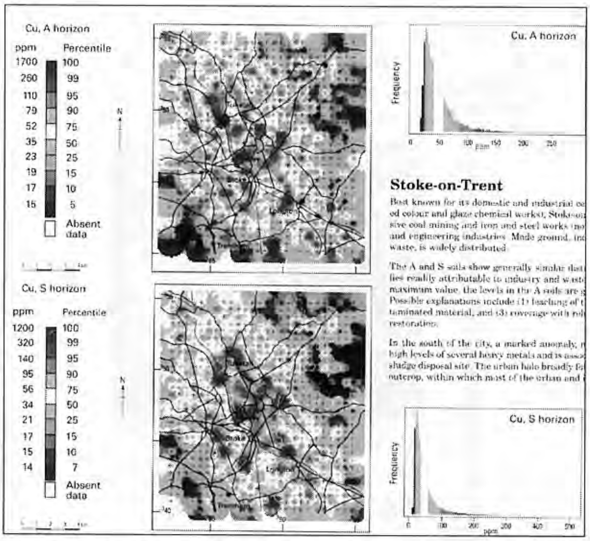
第3図　英国地質調査所発行の河川堆積物地球化学図（Wales地方）．

また土壌試料の採取は都市化の進んだLiverpool地域やManchester地域をはじめとする東西86km，南北175kmの地域に限定され，試料採取数は3,811箇所，1km²に0.5点という割合で試料採取が実施され，約90万分の1の縮尺の土壌地球化学図が作成された（第4図）．

RWales地方の地球化学図では，約10万分の1～約20万分の1の縮尺の市街地域の土壌地球化学図（Soil Geochemistry of urban areas）も公表されている（第5図）．この市街地土壌地球化学図はCardiff, Stoke-on-Trent, Swansea, Telford, Wolverhamptonの各市街地域およびその周辺の東西18km～20km，南北14km～16km程度の地



第4図　英国地質調査所発行の土壌地球化学図（Wales地方）．



第5図　英国地質調査所発行の市街地土壌地球化学図（Stoke-on-Trent市）．

域を対象として，140箇所（Wolverhampton）から370箇所（Stoke-on-Trent）で土壌試料採取を行い銅の含有量分析を実施している．ただし表層から15cm下（A horizon）と50cm下（S horizon）で土壌採取をしているため，分析数は試料採取地点の倍である．例えばStoke-on-Trentでは1km^{2}に1.8点という割合で試料採取が実施され，A horizonとS horizonの銅の濃度分布が約20万分の1の縮尺で図化されている．Soil Geochemistry of urban areasは分析対象とした元素が銅だけなので，まだ試行的な土壌地球化学図である．

なお，著者らは2002年の3月に英国地質調査所を訪問し，David Ovadia氏（Head of International）や，Christopher Johnson博士，Barry Smith博士ら（Natural Environment Research Council）から，G-BASE programmeの地球化学図製作過程の概要や，年間予算規模，研究体制について説明を受けた．彼らの話では，G-BASE programmeは年間予算規模150万ポンド（ただし分析費用などは含めず）で，約40名の研究員や学生が参画して2012年まで継続されるという．

また，彼らの説明では，英国の土壌汚染問題への関心の増加に符号させるために，今後は市街地域の土壌地球化学図に力を入れる計画であるという．恐らくWales地方の地球化学図の次に製作される予定の出版物には，銅を含む多くの重金属を対象としたSoil Geochemistry of urban areasが登場すると思われる．

3. 土壌・地質汚染評価基本図のデザイン

3.1 従来の地球化学図や地質図との関係

産業技術総合研究所地質調査総合センターでは，旧工業技術院地質調査所時代にすでに北関東を対象として20万分の1地球化学図を出版した（伊藤ほか，1991）．また現在は日本全国を対象として200万分の1縮尺の地球化学図を作成中である（今井ほか，2001）．この200万分の1縮尺の地球化学図は10km^{2}に1試料の割合で河川堆積物の化学分析を行うものであり，英国地質調査所G-BASE programmeの河川堆積物地球化学図（約90万分の1の縮尺）に対応する．

しかし，産業技術総合研究所地質調査総合センターでは英国地質調査所G-BASE programmeの市街地域土壌地球化学図（Soil Geochemistry of urban areas）に対応する地球化学図はまだ作成されていない．従って，土壌・地質汚染評価基本図

は，G-BASE programmeの市街地域土壌地球化学図（約10万分の1～約20万分の1の縮尺）を参考にして作成することが適切であると考えられる．

また，英国地質調査所のG-BASE programmeの地球化学図は地質図との連携を図り，地質図上に試料採取地点を投影できるようになっている．こうした地質図と地球化学図の連携は，様々な元素濃度値がどのような地質に対応するかを検討する上で重要である．そのため，土壌・地質汚染評価基本図は，産業技術総合研究所地質調査総合センターが作成している5万分の1地質図幅との連携を重視した．

3.2 土壌汚染対策法への対応

土壌汚染対策法では，有害物質使用特定施設を設置した工場・事業所を廃止した場合，敷地の所有者には土壌汚染状況調査義務が課せられると定めている．この土壌汚染状況調査の範囲は，有害物質使用特定施設の設置された工場・事業所の敷地すべての区域が対象となり，$100m^2$の単位区画において1地点の土壌試料採取等を行うこととなる．

また，有害物質使用特定施設を設置した工場・事業所が操業している場合や，かなり以前に操業を中止してしまって敷地が更地になっている場合でも，その土地や周辺の土壌汚染状況・土地履歴などから，基準値を超える有害物質の汚染が存在する可能性が高い場合や，土壌汚染に起因する地下水汚染の可能性が高く，地下水等摂取リスクがある場合にも，都道府県知事から土地所有者などに土壌汚染状況調査命令が出されると定めている．

こうした土壌汚染状況調査を実施する場合に留意すべき点は，汚染が自然的原因によるものか，人為的なものかを識別することである．環境省は都道府県知事や政令市長宛てに，土壌汚染対策法の施行通知（環水土第20号）を配布したが，その中の別紙1（この報告書では，施行通知別紙1と呼ぶことにする）として「土壌中の特定有害物質が自然的原因によるものかどうかの判定方法」を提示している．これは自然的原因による汚染が土壌汚染対策法の適用対象にならないようにするための措置である．

施行通知別紙1には，「土壌溶出基準に適合しない場合の判定基準」や，「土壌含有量基準に適合しない場合の判定基準」が記されている．これらの判定基準は，①溶出量や含有量に関するバックグラウンド値，②土壌をとりまく地質状況，③特定有害物質（砒素や鉛など）の化合物形態などに基づいている．

従って，土壌・地質汚染評価基本図がこうした判定基準に適したデータを提供できれば，指定調査機関が土壌汚染状況調査を実施する際に役立つはずである．そのためには，土壌・地質汚染評価基本図の対象地域に対して，①土壌の溶出量試験と含有量試験を実施して溶出量や含有量に関するバックグラウンド値を提供し，②土壌や堆積物がどのような地質環境を経験したかをまとめ，③化学的データのみならず，鉱物学的データを加えて特定有害物質（砒素や鉛など）の化合物形態を明らかにする必要がある．

4. 土壌・地質汚染評価基本図の特徴

土壌・地質汚染評価基本図は市街地の土壌や堆積物などを対象とした地球化学図を基本とするため，英国地質調査所G-BASE programmeの市街地域土壌地球化学図を参考とし，以下の点に留意した．

①土壌や堆積物の化学組成は深度方向に変化するため，深度別に複数の試料採取を実施する．

②5万分の1の地質図幅との連携をとる．

③高密度に試料採取を行う．

さらに土壌汚染対策法の施行通知（環水土第20号）に対応すべく，以下の点について留意した．

④砒素や鉛などの有害元素の溶出量や含有量が，地質学で使われている層序区分や堆積相とどのように関係するか，特に土壌や堆積物の堆積環境が有害元素濃度にどのような影響を与えるかを解明する．

⑤X線回折法や熱分析，透過型分析電子顕微鏡を用いて土壌や堆積物の構成鉱物を同定し，これらの鉱物含有量と重金属濃度との相関を調べる．

⑥鉛を対象として存在形態分析（分別抽出法分析）を行い，鉛の存在形態を明らかにする．また鉛同位体を用いた自然由来の鉛汚染と人為的鉛汚染の識別法を検討する．

これらの留意点を視野において，土壌・地質汚

染評価基本図の実施対象として，5万分の1地質図幅「姉崎」(徳橋・遠藤，1984)に表示された千葉県市原市及びその周辺が選定された．その最大の理由は，当地域周辺に分布している上総層群や下総層群の泥質層や砂層から環境基準値を超えた砒素が溶出することが報告されたためである(鈴木・かずさ砒素研究会，1998)．土壌・地質汚染評価基本図は，このような自然由来の汚染の実態と発生メカニズムを解明することを目的としている．

土壌・地質汚染評価基本図「5万分の1姉崎」に包有される千葉県市原市，袖ヶ浦市およびその周辺は日本有数の臨海工業地帯であるとともに，アクアラインの開通に伴って，将来は宅地化が進むと考えられる．しかし，この地域では砂取場跡などを対象として，首都圏から運ばれる残土が埋め立てられており，万一残土に有害物質が含まれる場合には，将来土壌・地質汚染の発生が危惧される．こうした背景を考えると，現時点において土壌・地質汚染評価基本図「5万分の1姉崎」を作成する意義は大きいと考えられる．

5. G-BASE programmeの市街地域土壌地球化学図との比較

土壌・地質汚染評価基本図「5万分の1姉崎」では，市街地域において1km²に対して0.3点～0.6点という割合で試料採取が実施された．この試料採取密度は，G-BASE programmeの市街地域土壌地球化学図(Soil Geochemistry of urban areas)の試料採取密度(1km²に対して1.8点)に比べて少ない数字である．しかしそれでも4km²に対して1点～2点の試料採取がなされているため，バックグラウンドデータの提供は可能である．

例えば大都市の地方自治体では，工場跡地を再開発して商業地や住宅地にする計画を進めている場合が多い．こうした都市再開発事業では，1km²程度の工場跡地(工場だけではなく，事務所や倉庫の跡地も含む)が対象となるため，1km²の工場跡地を包含する4km²に対して1点～2点のバックグラウンドデータが記載されていれば，土壌・地質汚染評価基本図としての役割を果たせると考えられる．

また，Soil Geochemistry of urban areasは銅の含有量のみを分析対象としているが，土壌・地質汚染評価基本図「5万分の1姉崎」では銅や亜鉛，ニッケルなどの金属元素とともに，砒素や鉛などの有害金属元素，ナトリウムやアルミニウム，鉄などの主成分元素の含有量分析も実施された．そのため，微量元素である砒素や鉛含有量と主成分元素である鉄やアルミニウムとの相関などを調べることにより，砒素や鉛の土壌中における挙動などを調べることが可能となっている．これらの含有量分析に関しては，土壌・地質汚染評価基本図「5万分の1姉崎」ではG-BASE programmeで最近採用された蛍光X線分析法を採用した．

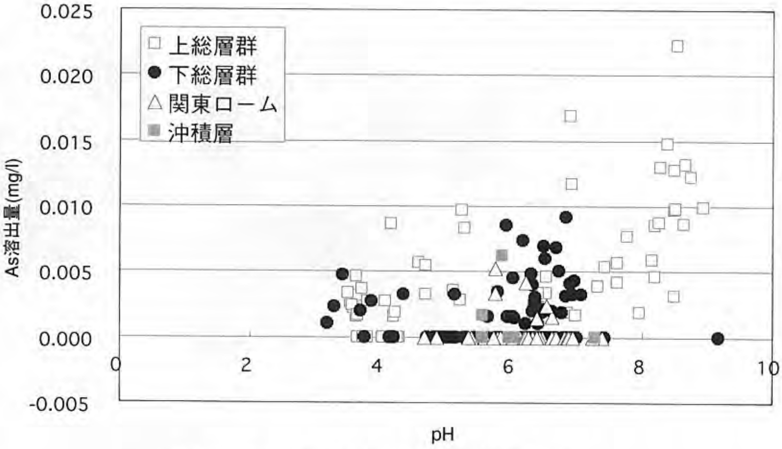
さらに，土壌・地質汚染評価基本図「5万分の1姉崎」では，含有量分析とともに溶出量分析も実施されている．これは土壌汚染対策法が土壌の汚染評価のために，含有量試験と溶出量試験の実施を義務付けているためである．

しかし，土壌・地質汚染評価基本図「5万分の1姉崎」の最大の特徴は，印刷物としての出版をせずにCD-ROMを媒体とするデジタル出版にしたことである(口絵1)．将来，土壌汚染対策法を施行するための環境省告示に明記された含有量や溶出量試験法が改められる場合や，あるいは新たに特定有害元素が指定された場合には，再度試料の分析を実施して土壌・地質汚染評価基本図「5万分の1姉崎」を改訂することも可能である．

土壌・地質汚染評価基本図はマイクロソフト社のWindows95以上あるいはWindowsNT以上のOSがインストールされたコンピュータで閲覧するために作られている．一部アドビシステムズ社のAcrobat reader，マイクロソフト社のExcelを必要とするが，基本的にはHTML形式で書かれているため，マイクロソフト社のInternet Explorerやネットスケープコミュニケーションズ社のNetscape Navigatorなどのインターネットブラウザで閲覧することを目的として作成された．

口絵2に土壌・地質汚染評価基本図の構成を示す．デジタル化された5万分の1地質図幅「姉崎」上に試料採取地点(堆積物がある場合には柱状図も)が表示され，各採取地点をクリックすると左側に採取地点の写真が，右側に蛍光X線分析結果と溶出試験結果が表示される．また，説明書のメニューをクリックすると，画面中央に説明書が，左側

第6図　5万分の1地質図「姉崎」地域層序総括図（徳橋・遠藤 1984一部改変）.



第7図　砒素の溶出量と検液のpHの相関図.

に図表番号，右側に説明書に登場する用語の解説や，含有量試験や溶出量試験に用いた重金属の機器分析法の説明書が表示される．

なお，土壌・地質汚染評価基本図「5万分の1姉崎」は英国地質調査所がかつて採用していたpoint-source geochemical dataの表現を採用している．すなわち試料採取地点の分析データはその地点でのデータでしかなく，その周囲の一定面積の代表データではない．これは土壌や堆積物の化学組成が均一ではないことに起因する．ただし，試料採取地点の地質が地質図のどの地層に対応するかを調べることにより，試料採取地点の試料と同様の地質がどのように分布するかを推定することは可能である．

6. 土壌・地質汚染評価基本図「5万分の1姉崎」によって得られた知見

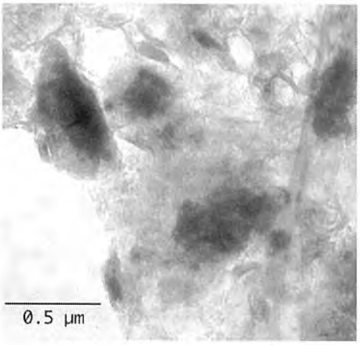
土壌・地質汚染評価基本図作成のために実施した地質調査や化学分析を通して，土壌汚染対策に役立つ様々な知見を得ることができた．その中の一つが堆積物からの砒素の溶出メカニズムに対する知見である．

土壌・地質汚染評価基本図「5万分の1姉崎」の調査域には，下位から上位に向かって，すなわち時代の古いものから新しいものに向かって，上総層群，下総層群，関東ローム，沖積層が分布している(第6図)．これらのうち，砒素の溶出量が環境基準値(0.01mg/l)を超過したのは上総層群の海成堆積物だけであり，関東ロームからの溶出は極めて少ない(第7図)．

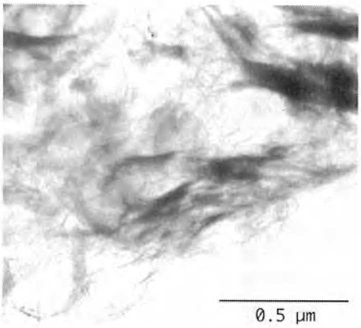
こうした上総層群海成堆積物には貝殻などを起源とする炭酸カルシウムが含まれるため，検液のpHが7以上(場合によっては8以上)になる場合がある．上総層群海成堆積物を構成する粘土鉱物はモンモリロナイトやクロライトなどであるが(第8図)，これらの鉱物は検液のpHが7以上になると，砒素を十分に吸着することができないため，検液中の砒素が増加する(丸茂, 2003)．

しかし，関東ロームを構成する粘土鉱物のハロイサイト(第9図)は，検液のpHが7以上であっても砒素を十分に吸着することができる(丸茂, 2003)．従って砒素の溶出量は極めて少ない．

上総層群の海成堆積物は姉崎地域の東南部の丘陵地に分布するが，これらは自然由来の砒素汚染の原因となる可能性がある．従って，こうした丘陵で工業団地や宅地を開発して上総層群の海成堆積物を掘削する場合，これらを残土として別の土地に運送する際には，砒素の不溶化処理を施す必要がある．土壌汚染対策法は原則として自然由来の砒素汚染に対しては関与しない．しかし，自然由



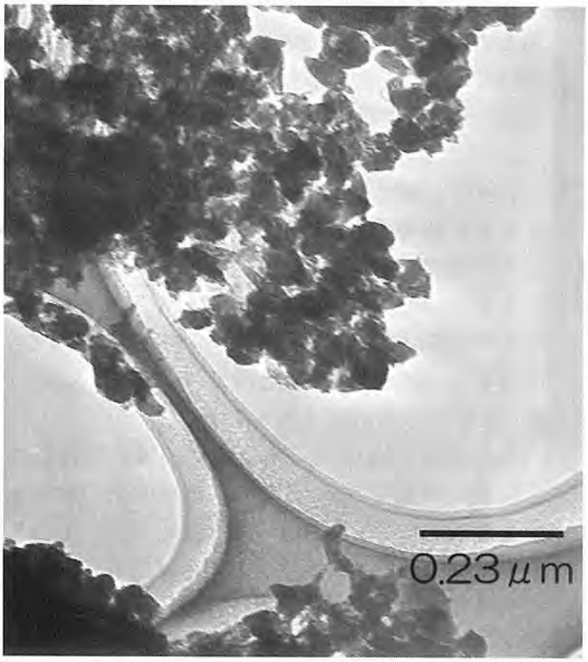
笠森層　モンモリロナイト



国本層　モンモリロナイト

柿木台層　クロライト

第8図　上総層群中に含まれる微細粒子の電子顕微鏡写真.



第9図　関東ローム中に含まれる微細粒子の電子顕微鏡写真.

来の砒素汚染のある土壌や堆積物を，自然由来の汚染のない場所に運搬・放置した場合には，その行為は人為的汚染とみなされる（土壌汚染対策法の施行通知）.

7. 終わりに

土壌・地質汚染評価基本図「5万分の1姉崎」は，英国地質調査所のSoil Geochemistry of urban areasを参考としながらも，単に分析データを地図に投影するという段階には留まらず，土壌や堆積物中の有害金属の存在状態や，土壌汚染の発生メカニズムにまで言及している．土壌・地質汚染評価基本図「5万分の1姉崎」は英国地質調査所のSoil Geochemistry of urban areasと同様に前例のない地図である．その意味においてこれらは土壌汚染対策を視野に入れた試作版と言える．

今後は，土壌汚染調査に従事している地質コンサルタント企業や，土壌汚染問題を担当している地方自治体関係者，大学の有識者と意見交換を行

い，新たに土壌・地質汚染評価基本図を作成すべきか，作成するとしたらどのような地図であるべきかについて検討したい．

謝辞：土壌・地質汚染評価基本図の作成のための試料の化学分析では，産業技術総合研究所地球科学情報部門の岡井貴司氏，寺島　滋博士，海洋資源環境研究部門の川幡穂高博士に様々な便宜と協力をいただいた．また土壌・地質汚染評価基本図の出版にあたっては，地質調査情報部の山本洋一さん，渡邊頼子さんに様々な便宜を図っていただいた．

文　献

British Geological Survey (2000)：Regional geochemistry of Wales and part of west-central England:stream sediment and soil, 156p.

伊藤司郎・上岡　晃・田中　剛・富樫茂子・今井　登・金井　豊・寺島　滋・宇都浩三・岡井貴司・氏家真澄・柴田　賢・神谷雅晴・佐藤興平・坂本　亨・安藤　厚(1991)：地球化学アトラス－北関東－，地質調査所．

今井　登・寺島　滋・岡井貴司・金井　豊・御子柴真澄・上岡晃・富樫茂子・松久幸敬・谷口政碩・横田節哉(2001)：国内外の地球化学図と日本全国をカバーする地球化学図プロジェクト，地質ニュース，no.558, 9-17.

丸茂克美(2003)：地圏・水圏の有害重金属挙動に対する粘土の役割，粘土科学，vol.42, no.3, 120-128.

丸茂克美・竹内美緒・江橋俊臣・楡井　久(2003)：土壌・地質汚染評価基本図「5万分の1姉崎」，独立行政法人産業技術総合研究所地質調査総合センター．

鈴木喜計・かずさ砒素研究会(1998)：自然地質からの砒素の溶出，砒素をめぐる環境問題，日本地質学会環境地質研究会編，東海大学出版会，202p.

徳橋秀一・遠藤秀典(1984)：姉崎地域の地質，地域地質研究報告(5万分の1図幅)，地質調査所 136p.

MARUMO Katsumi, TAKEUCHI Mio, EBASHI Toshiomi and NIREI Hisashi (2003)：A review of "Regional geochemistry of soil and sediment of Anesaki (1：50,000)"

<受付：2003年5月15日>