土壌汚染対策の課題と環境地質学の役割

駒 井 武*

Role of Environmental Geology in Remedial Action for Soil Contamination

Takeshi KOMAI*

Abstract

Recently, environmental problems caused by hazardous chemicals have become a great concern in terms of geo-pollution and soil contamination. Natural sources of heavy metals in soil and sediments are quite common in the subsurface environment in Japan, which has large metal deposits and geologic formations from marine strata. Background levels of As, Pb, Cd, and other toxic elements are relatively high in soil and sediments compared to other countries in Europe and Asia. This paper presents the features of heavy metals in soils, and the distribution and concentration of heavy metals in Japan in terms of soil and geo-pollution. We have developed a geo-informatics system with risk maps for heavy metals on a regional scale, based on the accumulated results of various geological and environmental surveys. The role of environmental geology is also discussed to propose remedial action for soil contamination, and to reveal the importance of risk management. The geo-environment risk assessment system, one of the outcomes of our research, can be used to reduce contamination due to heavy metals and toxic chemicals in soil using geo-environment information data. These research outcomes can also be applied to environmental problems such as ecological risk assessment, tunnel excavation in civil engineering, and land use policy in industrial location.

Key words : soil contamination, geo-pollution, risk management, heavy metal, geo-environment informatics

キーワード：土壌汚染，地質汚染，リスク管理，重金属，地圏環境情報

I. はじめに

近年，有害化学物質による人や生態系への影響が懸念されており，現実に固体廃棄物，排水や汚泥に起因する環境問題が世界各国で報告されている。典型的な事例としては，鉱山開発や廃棄物処理に伴って発生したカドミウムやヒ素による健康被害，各種産業に起因する鉛，ダイオキシン類，PCB などによる環境問題などがある。また，火

山や温泉に起因するヒ素の濃集や花崗岩に由来するフッ素の高濃度地域なども報告されている。このような有害化学物質に起因する環境汚染の代表的なものが，表層土壌および地下水を含む地層中における土壌・地質汚染である。

土壌や地下水に関わる地質環境の汚染は，目に見えない地下で発生するため被害の拡大が感知されにくく，蓄積性が高く長期にわたり残留し，さらに調査や浄化が困難であるなどの特徴がある。

* 独立行政法人産業技術総合研究所地圏資源環境研究部門

* Institute for Geo-resources and Environment, National Institute of Advanced Industrial Science and Technology

このような理由からこれまでわが国の土壤汚染は潜在的であったが、2003年に施行された土壤汚染対策法を契機として、調査や浄化が本格的に行われるようになり汚染の実態が明らかになりつつある。

地質環境汚染は大きく分けて自然起源のものと人為起源のものがある。自然起源の汚染は主に重金属が周辺の地質環境の影響で濃集したもので、人為起源の汚染は人類の活動によって、様々な有害物質が地質環境を汚染したものである。地質環境汚染への対策では、これら汚染の実態を知ることがまず必要である。自然起源の重金属汚染については、これまで鉱床探査や資源量評価に関する地質学、地球化学の研究調査に関連した広域的地球化学図（田中、2003）や、これらに基づいて作成された特定地域を対象とした土壤・地質汚染評価基本図が利用できる（丸茂・根本、2006）。一方、土壤・地質汚染の主な原因である人為起源の汚染については、産業活動を主要対象とした汚染状況に関する地圏環境評価の検討が開始されている。いずれも広範な調査とデータ解析を必要とするため、最終的な目標を達成するには長い期間と費用を要するが、成果物としての土壤環境評価図や地圏環境評価システムなどの知的基盤は、今後土壤・地質汚染のリスク管理を実施する上できわめて重要なものとなるだろう。

このような土壤・地質汚染を調査・評価し、そのリスクを管理するためには、種々の科学的、社会的な施策が不可欠であり、2003年に上述の土壤汚染対策法が施行された。法施行以来、汚染の実態が徐々に明らかになるとともに、日本各地で汚染調査や汚染浄化が進んでいる。しかし、最近では実際に採用されている調査・分析法に多くの問題点が指摘され、これらの改善が必要な状況となっている。特に、現行の汚染調査法では、機械的に割り振られた表層土壌部分のみの調査や、公定法（環境省が規定した方法）に記載された手法のみによる分析など、科学的知見からの調査が不十分なままにあり、こうした科学的知見の欠如に起因する汚染の見逃しが危惧されている。また、土壤・地質汚染が自然起源であるのか、人為起源

なのかを判別する手法が確立せず、これらに関する知見や情報の集積が求められている。

本報告では、まず（1）土壤・地質汚染およびその対策の現状について概観し、汚染対策に関わる問題点や科学的な課題を整理する。次に、（2）鉛、水銀、ヒ素などの重金属類を中心に、自然界のバックグラウンドレベルと空間分布の特徴から推測される自然起源の汚染メカニズムの一例を紹介する。さらに、（3）土壤・地質汚染のリスク管理を行う上で必要なリスク評価手法や土壤環境基本図の作成、わが国における地圏環境情報の整備の状況を報告する。最後に、（4）環境地質学的観点から土壤・地質汚染の調査・評価手法とリスク管理のあり方について論じる。

II. 土壤汚染対策の現状と問題点

1) 法施行後明らかになった汚染の現状

2003年の土壤汚染対策法の施行以後、土壤・地下水汚染の調査および浄化の件数は右肩上がりの増加を示している。2006年の最新調査データ（図1）によれば、わが国の環境基準超過あるいは調査事例は年間800件を超え、土壤汚染対策法の施行以前（2002年）の3倍以上に達している（環境省水・大気環境局、2006）。また、産業活動に起因する潜在的な土壤汚染サイトの総数は全国では約40万件、東京や大阪などの大都市圏では数万件以上と推計されている（日本地盤環境浄化推進協議会、2002）。汚染の原因としては、鉱工業などの産業活動に関連する排水および廃棄物の不適切な処理が相当数にのぼり、汚染物質を含む地下浸透や粉じんの排出による事例も多い。土壤・地質汚染の原因となる化学物質には、鉛、ヒ素、水銀などの重金属類、トリクロロエチレン、ベンゼンなどの揮発性有機化合物（VOC）、PCBおよびダイオキシン類、農薬類がある。いずれも土壌中の蓄積性あるいは残留性があり、人への健康影響が懸念される有害化学物質である。

法の施行に伴い、これまでの土壤環境基準（環境庁告示46号に基づく溶出試験）による一律的な環境規制からリスク管理へ移行したことは地質環境汚染を扱う上での大きな転換であった。この

図 1 わが国における土壤汚染の調査および基準超過件数の推移（環境省水・大気環境局, 2006）.

Fig. 1 Trend of number of contaminated sites compared to soil criteria in Japan (after Ministry of the Environment, Environment Management Bureau, 2006).

中で、有害化学物質の人への暴露（Exposure）をコントロールし、リスクを低減させるための様々なリスク管理上の措置が認められた。暴露の観点からは、地下水経由の間接暴露を勘案した従来の溶出試験に加えて、汚染土壌の直接暴露を評価する含有量試験による基準値が新設された。さらに、土壤汚染の指定地を特定するための汚染調査法として、一定間隔の区画を設定した表層土壌のサンプリング手法が規定された。しかしながら、現状では汚染の見逃しや分析試験法の問題点、自然起源と人為起源の汚染の判別など、以下に整理する多くの課題が指摘されている。今後、環境地質学をはじめとする様々な分野の基礎科学を駆使して、これらの諸課題に対処していく必要がある。加えて、基礎科学にとどまらず、社会的視点を含めた環境科学のアプローチも重要である。

2) 法施行後の問題点

2-1) 土質、地質調査の問題点

汚染された土地の区画を機械的に割り振りし、深度方向に一定深さで土壌をサンプリングする方法は、汚染の範囲を推定するには有効な手法かも

しれないが、一方では致命的な見逃しを引き起こしやすい。なぜなら、地層中の汚染物質の蓄積や移動は、土質や地質の特徴に依存するからである。また、都市部にみられる人工的な地層の多くは、同時期に同様な手続きで堆積し、類似した環境汚染物質を含む地層を形成している。このため、地質学的知見に基づく単元調査法の普及が推奨される（楡井, 2007）。さらに、より安価な汚染調査法として、簡便ボーリング（例えば、プローブ法や貫入法）などの土壌・地質調査手法の導入も有効である。地層の三次元構造や汚染物質の存在の可能性を推定する手法としては、地上からの物理探査法の活用も期待される（内田, 2004; Abdel Aal *et al.*, 2006）。

2-2) 試験分析法の問題点

重金属等の指定基準では、溶出試験による溶出量値と含有量試験による含有量値の両者が基準値となっている。両者を同時に満たす環境条件や浄化目標などに制約があるため、法の運用が困難なケースもみられる。欧米では含有量値のみで評価する場合が多く、日本での試験法のあり方について再検討が必要であろう。

特に、溶出試験では土壌コロイドや腐食物質の存在などが測定値に影響を与える場合があり (Ogawa, 2006), 検液中におけるこれらの特性に関する基礎的な検討が必要である。含有量試験では 1 M (mol/l) 塩酸を溶出操作に使用するため、粒状物質のフィルターの目詰まりや検液の廃棄処理といった技術的な問題点もある。現場で安価に汚染物質を分析するため、蛍光 X 線装置を用いた携帯型重金属分析装置 (丸茂ほか, 2006), ボルタンメトリー・ストリッピング法を用いたオンサイト簡易分析法の開発および普及 (東京都環境局, 2006) も必要である。このような現場型の分析システムの普及を促進するためには、公定法に準ずるなどの法的な裏付けも重要な検討課題といえよう。

2-3) 地圏環境情報の欠如

地球化学図や土壌・地質汚染評価基本図にみられるように、わが国の重金属のバックグラウンド値は高い傾向にあり、また高濃度地域も偏在している (土屋ほか, 2006)。したがって、土壌・地質汚染の評価では、重金属類の高バックグラウンド値の原因を解明するとともに、地域ごとの濃度レベルに対応したリスク管理が肝要である。しかし、重金属類の評価については、一部の地域で地質学的研究が行われているだけで、全国規模の調査はなされていない。このため、表層土壌環境に関する基本情報が不足しており、汚染対策に活用可能な情報が十分整った状況にはない。例えば、鉱床地域や市街地付近の地層ではヒ素の濃度 (含有量, 溶出量) が高く (丸茂・根本, 2006), 基準値を超過するケースが多数あるが、これが深刻な人為汚染とみなされて浄化する例も報告されている (環境省土壌環境課, 2007)。

最近、産業技術総合研究所を中心に地球化学図、土壌環境基本図、水文地質図、地下水汚染図などを含む地圏環境情報の整備が開始された。公共財とするためには、これらの多岐にわたる情報を GIS 上に統合して、一般に使用可能な利便性の高いシステムとして整備することが重要である。地圏情報に加えて、産業立地や土地利用状況、河川流域や植生などの情報も有効である。

3) 学術的な課題

3-1) 地質学的な特徴と環境汚染

わが国の地質学的な特殊性を踏まえた土壌汚染対策として、特に環境汚染の自然的要因に関わる取り組みが重要である。例えば、鉱山や鉱床、火山地帯、温泉にみられる特徴的な地層構造、海岸付近の人工地層や埋立地などの形成過程に関する考察が必要である。わが国の土壌には火山灰を起源とするものが多く、特異的な吸着特性を示す土壌、自然的にヒ素や鉛を高濃度で含有する地層もみられる (丸茂・氏家, 2006)。また、花崗岩地帯ではフッ素、蛇紋岩を胚胎する地層ではクロムの濃度が高い傾向にある。

3-2) 土壌・地質汚染の基本的な理解

土壌形成過程における汚染物質の無機的、有機的な関与、有害元素など汚染物質のトラップおよび濃集メカニズムに関する知見が重要である。特に、土壌形成時の腐食物質や粘土鉱物の寄与、微生物の関与の有無など基礎的な理解が不可欠である (Fukushima, 2006)。また、汚染物質の移動における土壌間隙の役割など、土壌層の物理的特性の基礎的な検討が求められる。

3-3) 地質学と生物学との融合

土壌や地層中の様々な現象を把握するためには、従来の地球化学の知識に加えて、生物学的な知識も求められる。生物地球化学をはじめとして、土壌や地下水中の微生物の生態を取り扱う地下微生物学、地中生物や植物と汚染物質の関わりを取り扱う生態毒性学、植物浄化の新たな分野であるファイトレメディエーション (Phytoremediation) など、これから開拓すべき研究分野は多い。例えば、竹内ほか (2005) によると、地下水中に生息している脱塩素化細菌がテトラクロロエチレンのような有機塩素化合物に対して高い生分解性を示すことが報告されており、新規の汚染浄化技術としての期待が大きい。

さらに、ゼオライトなどの粘土鉱物の吸着機能と上述の生物的手法を組み合わせた新規の浄化技術の開発も期待される (鈴木, 2005)。

3-4) 地質学とリスク科学

環境汚染は人への健康に悪影響を及ぼすことか

ら、そのリスクを軽減するため欧米では医療地質の研究が広く行われている (Selinus *et al.*, 2005)。これまでに述べた有害元素を中心とする環境科学、地質学的な知見の毒性学や医学への適用、汚染物質による暴露とリスクを分析するリスク科学などである。わが国では過去の公害問題においてかなりの蓄積があるが、医療地質学の基礎研究や知的基盤の整備が遅れている。土壌・地質汚染問題では、複合汚染による健康影響、未規制物質のリスク評価手法、環境汚染情報のデータベースなど、今後実施すべき課題は多い。

III. 土壌・地質汚染の要因

1) 自然的原因

土壌・地質汚染の原因を適正に評価するためには、自然界において元素（主に重金属類）がどの程度の量と濃度で存在し、その分布状況を把握することが重要である。しかし、これまで土壌・地質汚染の自然的原因に関する検討はほとんど行われていない。そのため、重金属類のバックグラウンドの絶対値や、地域偏差など、科学的に解明すべき事項は多い。この種の検討に役立つと考えられる基本データとして、地球化学図がある（今井ほか, 2001）。これらの基本図は、もともと有用な資源元素を胚胎する鉱床探査を目的として作成されたものであり、わが国でも資源探査のために鉱床に深く関わる地域を中心に整備されてきた。イギリスやドイツでは、地球化学図を土壌汚染の評価に適用するための詳細な研究調査が実施されているが、わが国では環境汚染に使用された例はほとんどない。この理由として、これまで土壌汚染問題に対する関心が低かったこと、全国調査には多大な費用と時間を要することがあげられる。しかし、土壌汚染対策法の施行や土壌試料の簡易分析手法の普及などとも相まって、後述の地圏環境評価図を全国規模で作成するための研究開発が開始されている。

図2は、代表的な重金属としてヒ素の全含有量（底質試験法等により分析された総量）に関する地球化学図である（今井ほか, 2004）。ここで対象とした試料は、主に河床堆積物である。河床

堆積物は、総合的にその地域の化学成分を代表するとされており、また採取の容易さや再現性の点でも優れている。一方、市街地土壌や農用地土壌は人間活動の変化が反映されやすく、必ずしも地域の特徴を代表したものとは言えない。図2によれば、ヒ素の全含有量は全国的に2桁ないし3桁の差異があり、北海道、東北、中部および中国地方を中心に高濃度の地域がみられる。また、バックグラウンドレベルは地域による差異がきわめて大きく、その分布も限られた地点に高濃度地域が偏在しており、地質学的な構造や胚胎する鉱床、岩石の特徴などを反映しているものと考えられる。鉛やカドミウムについても、おおむね同様な特徴と傾向を示している。このように、重金属の濃度レベルと分布は地域による特徴が顕著なので、それに対応したリスク管理が必要である。

2) 人為的な発生源

産業活動や人間の生活に起因する人為的な発生源は、地圏環境汚染における主要な問題である。土壌汚染を例にとれば、土壌中の重金属含有量は、もともと土壌が含有している自然起源のバックグラウンド値と、人為的な要因により負荷された含有量値の総和ということになる。重金属類については、かつては鉱廃水や鉱さい、精錬所や製鋼所からの排出量が大きく、これらが主要な汚染発生源となってきた。最近では、各種産業や焼却施設などの固定発生源から排出された排水、廃棄物および煤煙、自動車などの移動発生源から排出された気体状および粒子状物質が主要な汚染源となっている。

図3は、わが国の市街地の表層土壌を対象に調査された鉛の全含有量の分布を示したものである（土壌環境センター, 2000）。この環境調査は、主に産業活動の密集した地域（潜在的な汚染地帯）を対象としたものであり、人為的な原因を直接的に反映している。わが国における鉛のバックグラウンドレベルは10～20 mg/kg程度であるが、この調査結果によれば汚染地では500～1000 mg/kgのような高濃度レベルを示す地域もある。また、バックグラウンドレベルの10倍以上の高濃度を示す地域が多数存在し、明らかに人

図 2 わが国におけるヒ素の含有量の分布（地球化学図）（今井ほか, 2001）.

Fig. 2 Distribution of As content in river sediments in Japan, after geo-chemical map (after Imai *et al.*, 2001).

図 3 市街地における土壌中の鉛含有量の分布（土壌環境センター, 2000）.

Fig. 3 Distribution of Pb content in contaminated soil in Japan (after Geo-environment Protection Center, 2000).

為的発生源に起因した汚染を意味している。特異的な汚染地帯として、幹線道路の周辺で高濃度の鉛が残留している地域がみられる。これは、かつて有機鉛化合物を含有したガソリンを使用した影響と考えられる。一部の地域では土壤汚染対策法の指定基準値（150 mg/kg）を超過している土壤もあることから、健康影響が懸念される。

人為的発生源についての全国調査を実施することは困難であるが、今後土壤汚染対策法に関わる地質調査や浄化対策の実施により、広範なデータを蓄積できる可能性はある。しかし、現状では使用できるデータが限られていることから、以下のような方法と手順で人為的な発生源を評価・推定するしかない。まず、工業統計や人口動態の基礎データを活用して、全国的な潜在発生源のデータベースを作成する。次に、PRTR（化学物質移動登録制度）により収集された排出のデータを用いて、発生量や発生箇所の推定を行う（駒井・川辺, 2002）。これらの基本データに、重金属類の特徴や排出係数を加味して、全国的な発生源の分布図を作成する。このような推定データと実際の汚染データを組み合わせれば、より信頼性の高い発生源データベースを構築できると考えられる。

IV. 地圏環境情報の取得と解析

地圏環境における様々な情報は、土壤汚染だけでなく、土木工事、大規模建設、都市計画などの広範囲の分野において重要である。また、広域の生態系の評価や大規模事業を対象として実施される環境アセスメントにも有用な基礎データを提供する。産業技術総合研究所では、東北大学、同和エコシステムと連携して、地圏環境インフォマティクスシステムに必要な基礎データを取得している（土屋ほか, 2006）。最終的なターゲットは、全国をカバーする地圏環境情報のデータベース化および GIS システムとの統合化である。

具体的に述べると、本システムは、産業技術総合研究所で公開しているシームレス地質図（数値地質図）をベースとして、地球化学図、地形図、土壤図、地下水汚染図、鉱床・鉱染図、植生図などを解析し、GIS 上で統合したものである。以

下、本システム構築の前段として地圏環境評価図の作成を目的として実施した土壤・地質調査、特に表層土壤中の有害元素の分布を調べた結果について述べる（原・川辺, 2006）。

東日本における代表的な地域（本調査では、宮城県全域）を選定し、表層土壤における重金属類の分布調査を実施し、地圏環境評価基本図の作成を行っている。対象とした土壤は、自然的な環境において形成された表層土壤であるが、市街地では自然起源と人為起源が混在している地域もある。また、この調査では表層土壤に加えて、岩石露頭調査に基づく地質情報の取得および解析作業を行い、土壤中の重金属類の含有量および溶出量の分析作業および化学形態調査を行った。その結果、表層土壤中には母岩組成に依存する重金属が含有されていることがわかった。また、母材の供給時における堆積環境およびその後上流から溶出した重金属の負荷による蓄積がその分布様式に著しく反映されることが示唆され、表層土壤における重金属類の分布は河川流域（分水界）と良い相関を示した。また、同じ流域内においては土壤生成環境を反映する土壤種によって重金属類の存在形態に特徴があることが見いだされた。このように重金属類の分布様式および母材（岩石）中の含有量を把握することにより、重金属バックグラウンドレベルが明らかとなり、自然起源と人為起源の土壤汚染の判別を行う際の基礎データが得られた。

具体例として、図 4 に宮城県における表層土壤中のヒ素の溶出量分布および県内に分布する鉱床位置を示す（Hara and Komai, 2007）。鉱床付近には 5 つの火山地域（栗駒、鬼首、鳴子、船形、蔵王）が分布し、これらの火山活動に伴う鉱床、温泉、変質帯を水源とする河川が多くの支流を伴って仙台平野へと流れ下っている。主要な河川として迫川、江合川、鳴瀬川、七北田川、名取・広瀬川、白石川があるが、いずれも下流側は市街地に達している。鳴瀬川、広瀬川、白石川では局的にヒ素の溶出量値の高い部分が存在する。ヒ素濃集のメカニズムとして、移動性の高い化学形態あるいはコロイド粒子が河川の下流側に移動

図 4 宮城県地域における表層土壌中のヒ素溶出量の分布 (Hara and Komai, 2007)。

Fig. 4 Special distribution of As leaching content in surface soil in Miyagi Prefecture (after Hara and Komai, 2007).

し、市街地あるいはその近郊の有機土壌中に捕捉されたことが考えられる。一方、含有量値では指定基準値を超えるものはほとんどないが、河川の集水域にあたる支流の合流地点に高濃度部が検出されている。

V. 土壌汚染のリスク管理

土壌・地質汚染のリスク管理を行うためには、前述のように地圏環境に関わる様々な情報の整備が不可欠である。これに加えて、地圏環境情報を用いて自然条件や汚染条件の下で実際に人が受ける健康リスクを評価することもきわめて重要である。以下、地圏環境情報を活用したリスク評価の実例およびリスク管理のあり方について紹介する。

適切なリスク管理は、まず汚染現場における健康リスクを正確に評価することが前提となる。産業技術総合研究所では、このような用途で図5に示すような地圏環境リスク評価システム GERAS (Geo- Environmental Risk Assessment System) の開発を進めている (駒井・川辺, 2006)。

この研究開発では、全国規模の土壌・地質汚染の調査法と曝露・リスク評価の方法論を確立し、土壌汚染現場ごとの健康リスクを定量化できる評価システムを開発した。その後専門家の審査・評価を受けて 2006 年にシステムを公開するにいたった。現在、日本全国の 600 を超える事業所、浄化企業、コンサルタント、自治体、大学などに配布し、土壌・地質汚染のリスク管理ツールとして広く活用されている。

上記のリスク評価においては、何よりも土壌や地下水、地層の特性といった地圏環境に固有の基礎データの取得が重要である。したがって、全国規模の地圏環境インフォマティックスシステム、地域ごとの地圏環境評価図の開発が期待される。一例として、前述の溶出量の分析データを使用して、地圏環境評価システムによりヒ素の健康リスクを評価した結果を図6に示す (原・川辺, 2007)。このリスク評価では、全ての暴露経路 (直接摂取、間接摂取、食物経由など) を想定してヒ素の耐用 1 日摂取量 TDI (Tolerable Daily Intake) に対する割合を解析した。直接摂取の

Geo-environment Risk Assessment System (GERAS)

GERAS-1 (概念モデル) スクリーニング評価モデル

GERAS-2 (2次元モデル) サイト固有の評価モデル

GERAS-3 (3次元数値解析モデル) 浄化効果等を加味した詳細モデル

図 5 地圏環境リスク評価システムの概要と用途別の構成 (駒井・川辺, 2006)。

Fig. 5 Types of geo-environment risk assessment system and their use (Komai and Kawabe, 2006).

評価では全含有量を使用しているため、リスク値が過大評価されている可能性があるが、リスクレベルの地域的な分布を把握することができる。この結果によれば、ヒ素のTDIを超過している地域はほとんどないが、その10%を超えている地点（赤色で示す）が一部に存在する。これらの地点では、井戸水から水道水への転換のような暴露コントロールが必要と考えられる。今後、都道府県単位の詳細調査に基づいて、土壌中に含有する有害元素の濃度と分布に関する地圏環境情報の整備を行い、さらに精度の高いリスク評価の基礎データとすることが必要である。

VI. まとめ

わが国の土壌・地質環境では、鉱床や海成層が存在する地域のように、自然起源による重金属類のバックグラウンドが高く、高レベル地域が偏在するなどの特徴がある。本稿では、わが国の土壌

汚染対策の現状および課題を踏まえて、鉛、ヒ素などの重金属類を対象として、自然界の濃度レベルとその空間分布の特徴について述べた。また、土壌・地質汚染を評価・管理するために必要な地圏環境情報の収集と解析の必要性を明らかにする中で、土壌・地質環境に関わる種々の知的基盤の整備状況を紹介した。さらに、わが国の土壌汚染対策の問題点を整理し、これらを改善していく上で不可欠となる学術的な課題、特に環境地質学の果たす役割について論じた。このような研究成果は、土壌・地質汚染のリスク管理を合理的に実施する上での評価ツールおよびデータベースとしての活用が期待される。加えて、土木・建設工事において有害元素を含有する地盤に対するリスク回避のための基礎資料として、さらには産業立地や都市計画のための知的基盤としての適用も可能と考えられる。

図 6 宮城県地域における土壤中ヒ素に起因する直接および間接摂取のリスクマップ (TDI: 耐用 1 日摂取量) (原・川辺, 2007)。

Fig. 6 Risk map for As exposure due to direct and indirect intake from soil in Miyagi Prefecture (TDI: Tolerable Daily Intake) (Hara and Kawabe, 2007).

謝 辞

本研究を進める上で東北大学大学院環境科学研究科の井上千弘氏、産業技術総合研究所地圏資源環境研究部門の西澤 修氏には貴重な指摘をいただきました。心より御礼申し上げます。

文 献

- Abdel Aal, G.Z.A., Slater, L.D. and Atekwana, E.A. (2006): Induced - polarization measurements on unconsolidated sediments from a site of active hydrocarbon biodegradation. *Geophysics*, **71**, H13-H24.
- 土壤環境センター (2000): 平成 11 年度含有量参考値再評価業務報告書. 33-34.
- Fukushima, M. (2006): Evaluation of interactions between hydrophobic organic pollutants and humic substances. *Humic Subst. Res.*, **2**, 6-26.
- 原 淳子・川辺能成 (2006): 土壤中重金属情報の整備とリスク評価. 資源素材学会秋季大会要旨集, 23-26.
- 原 淳子・川辺能成 (2007): 宮城県迫川流域における自然由来の鉛濃度レベルおよびその起源とリスク.
- 土壤汚染と地圏環境インフォマティクス 2007 講演集, 10-16.
- Hara, J. and Komai, T. (2007): Development of Geo-informatics system. *Proceedings of Water Rock Interaction*, Kunming, China, 134-142.
- 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・谷口政硯・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のプロジェクト. 地質ニュース, **558**, 9-17.
- 今井 登・寺島 滋・太田充恒・御子柴 (氏家) 真澄・岡井貴司・立花好子・富樫茂子・金井 豊・上岡晃・谷口政硯 (2004): 日本の地球化学図. 産業技術総合研究所地質調査総合センター.
- 環境省土壤環境課 (2007): 土壤汚染問題の動向について. 土壤汚染対策セミナー 2007 予稿集, 2-7.
- 環境省水・大気環境局 (2006): 平成 17 年度土壤汚染対策法の施行状況及び土壤汚染調査・対策事例等に関する調査結果報告書.
- 駒井 武・川辺能成 (2002): 地下水・土壤汚染における環境リスク評価. 日本地下水学会誌, **45**, 73-80.
- 駒井 武・川辺能成 (2006): 土壤汚染リスク評価手法の開発と汚染事例への適用. 日本リスク研究学会論

- 文集, **19**, 397-400.
- 丸茂克美・根本尚大 (2006): 土壌・地質汚染評価基本図「5万分の1仙台地域」(数値地質図). 産業技術総合研究所, DGM E-2.
- 丸茂克美・氏家 亨 (2006): 仙台地域に分布する岩石・堆積物の重金属濃度異常. 2006 資源地質学会年会講演要旨集, 131-136.
- 丸茂克美・氏家 亨・小野木有佳 (2006): 微量重金属分析用蛍光 X 線分析装置の土壌環境評価への応用. X 線分析の進歩, **37**, 75-97.
- 日本地盤環境浄化推進協議会 (2002): 土壌・地下水汚染の実態とその対策. オーム社.
- 楡井 久 (2007): 単元調査法と無単元調査法. 産業と環境, **7**, 68-72.
- Ogawa, Y. (2006): Dissolution behaviors of elements from weathered slate deduced from successive filtration. *Water Dynamics: 3rd International Workshop on Water Dynamics, Sendai, Japan*, E-5.
- Selinus, O., Alloway, B., Centeno, J., Finkelman, R., Fuge, R., Lindh, U. and Smedley, P. eds. (2005): *Essentials of Medical Geology*. Elsevier.
- 鈴木雅史 (2005): 天然ゼオライトによる土壌汚染物質の除去電極の開発とその特性. 日本素材物性学会 2005 研究会講演要旨集, B-1.
- 竹内美緒・川辺能成・渡邊英治 (2005): 有機塩素化合物汚染地下水中の微生物相と汚染の自然減衰. 15 回環境地質学シンポジウム論文集, 93-96.
- 田中 剛 (2003): 天然資源と人為汚染を見分ける地球化学図. 資源地質学会編: 資源環境地質学—地球史と環境汚染を読む—, 373-378.
- 東京都環境局 (2006): 第四回土壌汚染処理技術フォーラム討論会資料, 10-23.
- 土屋範芳・駒井 武・白鳥寿一 (2006): 地圏環境インフォマティックスのシステム開発と全国展開. 地質ニュース, **628**, 21-28.
- 内田利弘 (2004): 物理探査技術の環境調査への応用. *Green Report* (産業技術総合研究所地圏資源環境研究部門研究報告会講演要旨集), 19-22.

(2007 年 10 月 1 日受付, 2007 年 11 月 30 日受理)