

鉍物油等に起因する土壤汚染のリスク管理と 対策技術の課題

駒井 武¹⁾

1. はじめに

最近, 各種の産業活動や人間活動に起因する土壌・地下水汚染が顕在化し, 一部では深刻な状況となっている。また, 2003年の土壌汚染防止法の施行に伴い, 事業所や市街地における環境リスク管理が重要な課題となっている。土壌・地下水汚染のリスクを適切に管理するためには, 汚染サイト調査やモニタリングを実施した後に, それらのデータを用いて汚染状態の程度, 規模, 拡がり(現状把握, 将来予測を含めて)などの技術的な評価を行うことが重要である。加えて, 汚染評価の結果や化学物質の情報をもとに, 人や生態系に対する影響について定量的に評価することが必要である。その手法のひとつとして, 欧米諸国では化学物質による健康影響の発生確率と影響度の関連を定量化する「リスク評価」の枠組みが採用されている。特に, 油分(鉍物油等)のような非規制対象物質については, 環境基準や指定基準のような統一的な指標が存在しないために, このような健康リスクの評価に基づく科学的な対応が必要である。筆者らは, 地圏環境における様々な汚染状況を科学的, 合理的に評価するための方法論を開発している。本報告では, 土壌環境におけるリスク評価について紹介するとともに, 最近新たに対策ガイドラインが示された鉍物油等に起因する土壌汚染について, 今後の対応および問題点について整理する。

2. 土壌汚染のリスク管理

汚染評価の判断基準としては, A) 環境基準や浄化目標値などによる一律的な評価, B) 曝露・リスクの解析に基づくサイト毎の評価, の2つに大別できる。わが国の環境行政では, 主にA)の一律的な評価が

行われており, 土壌環境基準および地下水環境基準などの基準値が設定されている。一方, 工場, 事業所といった特定の場所における自主管理を目的とした評価では, A)に加えて, B)サイト毎の諸特性(地質, 水理, 水利用, 土地利用, 生活形態など)に応じた汚染評価, すなわちサイトアセスメントを実施することが重要である。この場合, 定められた基準値などによる一律の評価は行わず, 環境マネジメントシステムの一貫として汚染調査・評価が実施される。個別の事業所において環境施策によるリスク低減の程度を明確化し, 環境マネジメントの効果を最適化するためには, サイトアセスメントによるリスク管理の取り組みが重要である。

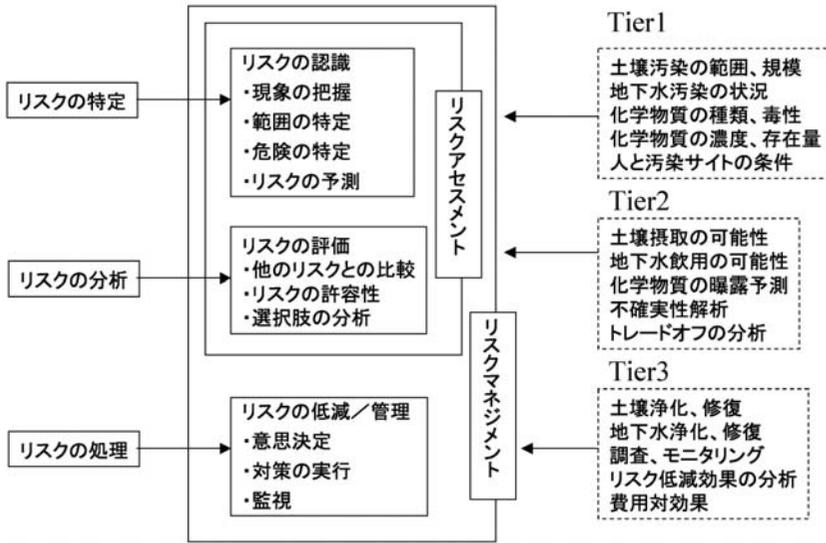
今回開発したスクリーニングツールは, 主に上記のB)の目的に使用される。具体的には, 次のような場合や状況において有効に活用できる。

- 1) 操業中の事業所などの環境マネジメント
- 2) サイトアセスメント(環境ISOを想定した評価)
- 3) 法制度で規定されない汚染物質(油分, 新規化学物質など)の評価
- 4) 曝露とリスクの科学的な評価
- 5) 汚染浄化によるリスク低減効果の評価(費用対効果, 環境経済性評価)

土壌汚染問題に対するリスク管理のアプローチを第1図に示す。汚染評価には, リスクの特定, リスクの分析・評価(Tier1:階層1), リスクの定量化(Tier2:階層2), およびリスクの処理(Tier3:階層3)などの各プロセスがあり, それぞれの中で曝露に基づくリスクの解析に関する具体的な検討が行われる。リスク分析の実際では, 土壌汚染によりどのような影響があるのか, その影響はどの程度の確率で起こり得るのか, その結果として何が悪くなるのか, などの各項目に対処することになる。リスク評価のプロセスで

1) 産総研 地圏資源環境研究部門

キーワード: 土壌汚染, 地下水汚染, リスク管理, 油汚染, 鉍物油



第1図
土壤汚染におけるリスク管理の基本的考え方 (Tier1：階層1, Tier2：階層2, Tier3：階層3)。

は、全体のシステム(例えば、汚染土壌を含む土地とその周辺環境)の中で、リスクを生じる危険性を認知し、特定するとともに、その結果として生じる有害な影響を確率分析や結果分析により推定するといったプロセスがとられる。さらに、リスク評価の結果は、リスク削減の定量的な評価や浄化対策の費用対効果、浄化活動の優先順位などに有効に活用される。

工場、事業所内の土壌・地下水汚染による影響やリスクレベル、その周辺への環境影響などを明らかにするためには、土地の利用形態、地質条件、水理特性、土壌や地下水の特性といったサイト特有のデータやパラメータを用いた評価を行うことが必要である。このような汚染評価のプロセスを、サイトアセスメントと呼んでいる。米国では、RBCA (Risk Based Corrective Action) の考え方が広く普及しており、個々のサイトのリスクレベルを明確にするための汚染評価および浄化目標の設定を目的として、実際のサイトアセスメントに活用されている。一方、平均的な濃度レベルなどの限られた情報だけで土壌汚染のリスク評価を行おうとする場合には、一般的な環境条件を想定した包括的アセスメントによるスクリーニングが行われる。米国、ドイツ、オランダ、英国などの欧米諸国では、それぞれの国で独自に開発された曝露評価モデルを使用して、比較的単純な曝露条件や典型的な曝露ファクターによる包括的アセスメントが実施されている。

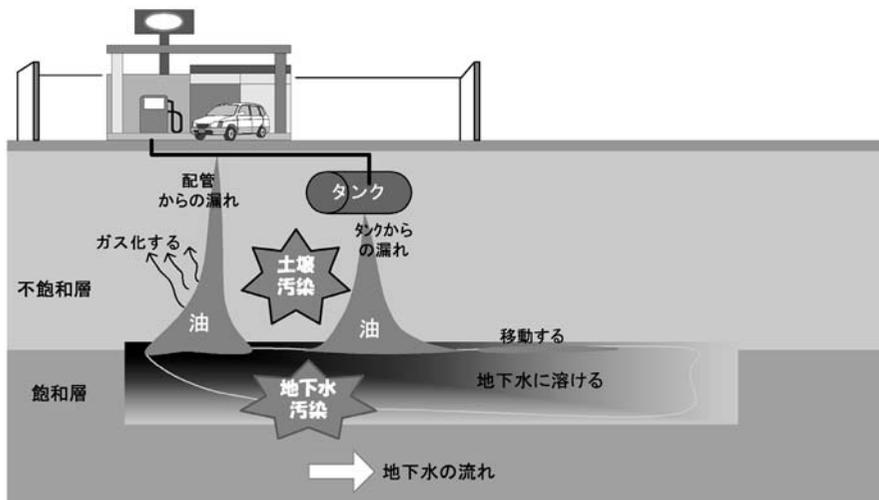
油分の土壌汚染対策では、重金属や有機塩素化合

物のように上記のA)による基準値の規制ができないため、サイト毎の特性に依存するサイトアセスメントを実施することが求められる。その基本となる考え方は、曝露・リスク評価に基づくリスク管理と考えられる。さらに、操業中の工場や事業所、油槽所やサービスステーション(以下、SS)では、土壌環境関連の法規制を受けないため、自主的な取り組みを進めることが重要である。以下、鉱物油等に起因する土壌汚染対策の考え方と問題点について整理する。

3. 鉱物油等による土壌汚染に関する対応

近年、工場や事業所、石油精製・貯蔵施設、SSなどの広範な土地において、油分に起因する土壌や地下水の環境問題が報告されている。2006年に環境省が公表した「油汚染対策ガイドライン」によれば、油分のうち鉱物油のみを対策要件の対象としている。このガイドラインは、土壌汚染対策法のように法規制の対象になるものではないが、今後の油汚染の対策の指針となる基礎的な事項を提示している。

ここで、鉱物油とはガソリン、軽油、灯油などの軽質油、重質油および潤滑油などの石油系燃料である。これらが漏出して地下に浸透した場合、土壌や地下水汚染の原因となり、人の健康や生活環境に悪影響を与えるおそれがある。このことから石油系燃料を取り扱う事業者は、漏洩防止に努めるとともに、漏洩が発生した場合は適切な対策を行う必要がある。石



第2図 石油系燃料による土壌・地下水汚染のメカニズム(全国石油協会, 2004).

石油系燃料による地下水や土壌の汚染事例は数多く報告されているが、環境基準のような定量的な指標がないために、汚染の実態はよく把握されていない。「油汚染対策ガイドライン」における評価のあり方では、表層土壌において油分の濃度が高く、生活環境に影響を与える可能性のある項目として油臭と油膜の有無をあげている。この中では、油臭と油膜の有無を確認する方法として嗅覚や視覚のような官能による方法を基本として、これらを補完するものとして土壌中のTPH(全石油系炭化水素：Total Petroleum Hydrocarbon)を用いることとしている。なお、油分に伴い土壌中にベンゼンや鉛(有鉛成分)が存在し、環境基準値を超過している場合には、土壌汚染あるいは地下水汚染と判断され、土壌汚染対策法による適切なリスク管理を実施することが求められる。

石油系燃料による土壌・地下水汚染のメカニズムを第2図に示す。漏洩した油分は、比重や粘性、揮発性や溶解度などに応じ、地下に浸透して土壌を汚染したり、揮発して土壌中の空気を汚染したり、地下水中に移動して地下水の流れとともに汚染を拡大させたりする。ガソリンなどの軽質油は比較的粘性が低いので浸透しやすく、水よりも軽いので帯水層に達しても地下水面上にとどまるが、地下水の流れに乗って水平方向に移動する。また、地下水位の変動によって深度方向にも汚染が拡大する。このように土壌中に浸透した軽質油は、土壌中に残留したまま長期間にわたり汚染の原因となる。土壌汚染が起ると、地下

水や表流水の汚染、農作物や動物への汚染物質の蓄積、汚染土壌の摂取や接触などによって、人の健康に悪影響が生じるおそれがある。また、生活環境や生態系への影響として、悪臭や油膜による不快感、農作物や樹木の生育阻害、土壌生物や地中微生物への悪影響も考えられる。

先般提示された「油汚染対策ガイドライン」の基本的考え方を踏まえ、今後重点的に検討すべきと考えられる事項は以下のとおりである。

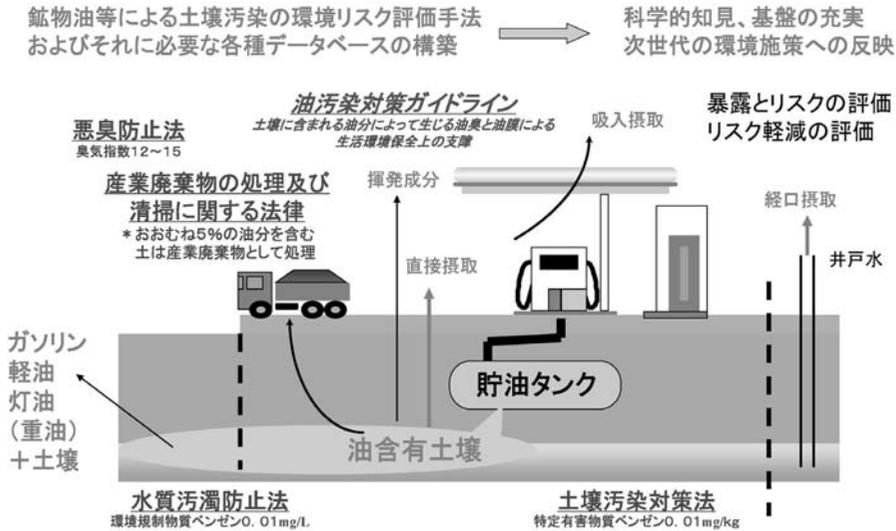
1) 油臭または油膜の有無の判定方法

現場において油臭あるいは油膜の有無を定量的に判定することは困難である。実際には、人による嗅覚と視覚による官能判断に頼らざるを得ない。「油汚染対策ガイドライン」では、官能による評価を補完する方法として、土壌中油分のTPHを用いてもよいとされている。しかし、最近報告された調査研究(全国石油協会, 2006)によれば、TPHと油臭の相関は低く、むしろTVOC(総揮発性有機炭化水素)との相関が高いとされている。このような定量的関係に関する科学的な知見の集積が必要である。

2) 油分の分析方法

わが国では、これまでにTPHやTVOCに関する標準的な分析方法やマニュアルは整備されていない。使用する分析機器の特性のみならず、汚染土壌からの抽出方法および溶媒の選定、化学分析に適用されるメソッドの確立など、今後検討すべき事項は多い。

3) 原位置での簡易測定方法



第3図 油汚染土壤の環境影響と関連する法体系。

嗅覚や視覚による官能試験を代替できる機器を開発することが重要である。代表的な例として、様々な臭覚の成分を総合的に判定する「におい識別装置」などがあり、一部では市販されているものもある。また、TPHやTVOCはサンプリングした後に実験室内で分析することが通常なので、より簡易な現場型の機器分析手法の開発が求められる。

4) 健康リスクの評価手法

油臭あるいは油膜の存在に加えて、汚染物質による健康リスクが懸念されるケースでは、油分汚染土壤のリスク評価を実施する必要がある。これまでに、米国のRBCAの評価システムで適用された事例があるが、評価手法が明示的なものではなく、また使用しているパラメータも信頼性が低い。そのため、わが国の土壤汚染においても使用できる評価システムやデータベースの開発が急務の課題である。このことについては、以下の第4章で詳しく述べる。

5) リスク管理と費用対効果

リスク評価の結果、許容できる範囲を超過していると判断される場合には、何らかのリスク管理が必要である。化学的あるいは生物学的に分解、変質して油分を除去する恒久的な浄化対策だけではなく、覆土や立入禁止などのリスク管理のオプションが設定される。油汚染対策では、重金属等による汚染事例と比べて、広範囲で高濃度の汚染が発生する機会が多いことから、より安価で確実な浄化対策の実施が求

められる。

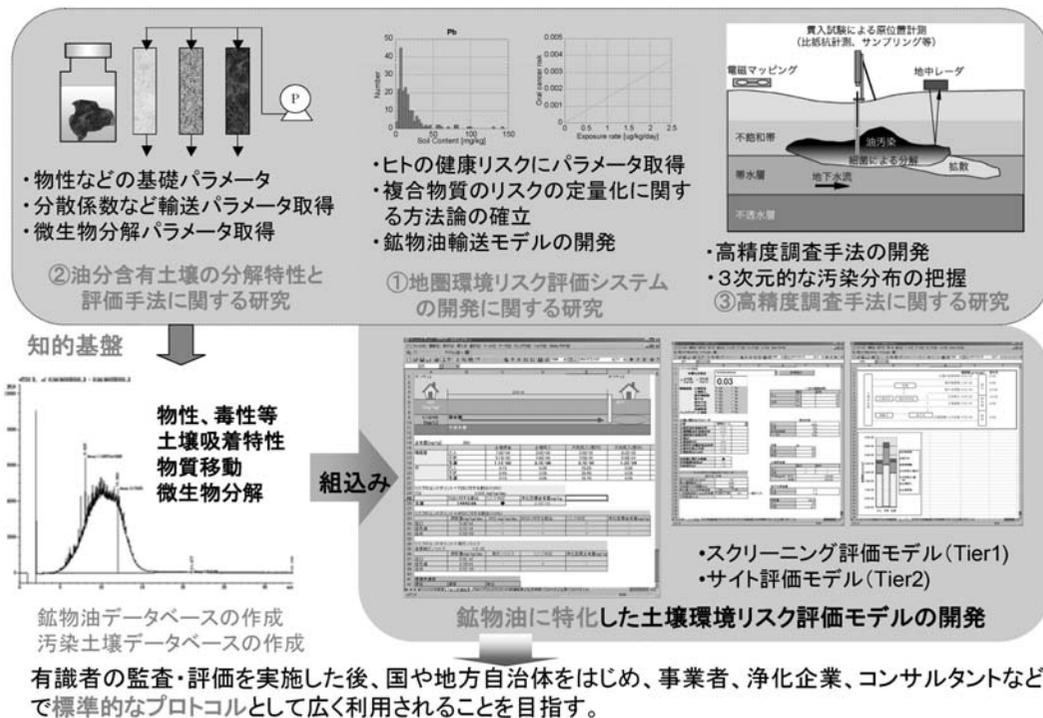
6) 植物や土壤生物などの生態系への影響

油臭・油膜といった生活環境影響や人に対する健康影響に加えて、深刻な油土壌汚染では周辺環境への影響が懸念される。特に、野菜、根菜、樹木などの植物への蓄積、ミミズ等の土壤生物および微生物への曝露に関する基礎的な知見が必要である。

4. リスク評価手法の研究開発

油分汚染土壤による様々な環境影響および健康影響と、関連する法規制の関わりを第3図に示す。環境汚染物質の漏洩あるいは汚染に関連する法律体系には、土壤汚染対策法をはじめ、水質汚濁防止法、廃棄物法、悪臭防止法などがある。しかし、油分汚染土壤に対する法規制は存在せず、最近提示された「油汚染対策ガイドライン」は鉱物油等の含有土壤の油臭と油膜のみを対象としたものである。このため、リスク管理を実施するには片手落ちの状況にあり、今後環境リスク手法の確立をもとに、次世代型の油分汚染土壤に特化したリスク評価システムの開発を推進することが必要と考えられる。

以上のような背景から著者らは、鉱物油に起因する土壤汚染の環境リスクを科学的かつ客観的に評価するためのリスク評価手法の研究開発をスタートさせた。研究内容とアプローチの方法を第4図に示す。こ



第4図 鉱物油等の土壌汚染問題に適用される地圏環境リスク評価システムの研究開発 (Tier1:階層1, Tier2:階層2).

の中では、石油系炭化水素に属する複数の汚染物質が共存する場合の環境リスクの定量化を可能にし、また評価システムの効率的な運用に不可欠な各種データおよびパラメータを取得する。特に、油分汚染土壌の化学的、生物学的、工学的な諸特性を把握するための分析・評価手法および高精度調査手法、さらにはデータベースを構築し、土壌汚染評価・対策に向けての知的基盤を整備する。

以下、研究開発の概要と3つのサブテーマについて紹介する。

1) 地圏環境リスク評価システムの開発

各種の鉱物油に含有される石油系炭化水素を対象として、複数の化学物質が共存する場合のリスクの定量化に関する方法論を確立するとともに、曝露評価モデルおよび各種データベースを内包した地圏環境リスク評価システムを開発する。また、これに必要な分配係数、土壌吸着係数など物質パラメータを実験的に取得し、油分含有土壌のデータベースとして整備する。開発した地圏環境リスク評価システムは土壌汚染用のスクリーニングツールとして一般に公開す

る。さらに、評価の結果は環境行政における政策提言に資するとともに、油汚染対策ガイドライン等にも反映させる。

2) 油分汚染土壌の微生物特性および評価手法

鉱物油を含む汚染土壌の特性および経時変化に関する基礎的なデータを取得し、上記の評価システムに必要な入力データとして石油系炭化水素の微生物分解や物理化学的特性の環境パラメータを集積する。また、微生物分解などによる鉱物油の劣化や風化の特性、さらには自然減衰の速度論的な評価手法を確立する。具体的なアウトプットは評価システム用のデータベースであり、バイオレメディエーションなどの土壌汚染の浄化・修復技術の評価、およびリスク管理の用途にも適用可能である。

3) 油分汚染土壌の高精度調査手法

地層内の石油系炭化水素による汚染領域を物理探査法および原位置物性計測によって3次元的に把握する調査手法を開発する。また、油分解菌による汚染油分の物性の経時変化や地下水流動に伴う汚染物質の拡散について室内実験等による検討を行う。

これらにより、評価システムに必要な物質および移動パラメータを集積するとともに、油分土壤汚染の分布とその時間変動を総合的に評価する手法を確立する。

5. 油土壌対策技術の現状と課題

油分による土壤汚染を浄化・修復するために、場外搬出、掘削後場内処理、原位置処理などの多種多様な方法や技術が適用されている。場外搬出では、汚染土壌を掘削除去した後に別の場所に搬出され、中間処理施設を用いた土壌洗浄、加熱処理、微生物処理等による浄化、廃棄物処分場への搬入、セメントに混入する原料などの方法により処理・処分されている。掘削後場内処理では、主に加熱処理、微生物処理等による浄化が実施されている。好気性の微生物を用いたランドファームング法は、油分に対するバイオレメディエーション技術のひとつとして頻繁に実施される。原位置浄化については、主として土壌ガスや地下水汚染の浄化を目的として行われ、土壌ガス吸引法、揚水抜気法、微生物分解法などが実際の汚染サイトに適用されている。しかし、油土壌汚染サイトの場所の制約、コスト面および効果面のいずれも優位性が高い浄化方法は確立されておらず、今後の研究開発に期待するところが大きい。

最近、操業中でも適用可能な原位置浄化手法が注目されている。ここでは、自然的な機能としての微生物による分解・無害化を目指した3つの技術体系を紹介することにする。

1) 微生物活性化法(バイオ・スティミュレーション)

微生物活性化法は、土壌中に新鮮な空気や酸化剤などを送り込み、土着の微生物を活性化させて、油分を分解・除去する方法である。土壌ガス吸引法などと比べて、吸引風量や送り込む薬剤量が少なく済み、浄化時間も比較的短いという特長がある。一方、土壌中の微生物のコントロールが相当困難な場合もあり、空気や酸化剤の注入量、到達範囲などの確認が必要である。この意味で、事前の適用化試験(トリータビリティ試験)と原位置のモニタリングが不可欠である。

2) 微生物添加法(バイオ・オーギュメンテーション)

微生物活性化法が土着の微生物を活用するのに対して、微生物添加法は油分解用の微生物(あるいは複

合微生物)を土壌中に注入する方法である。もともと油分の分解に適した調整がなされているので、微生物活性化法よりも浄化効果は大きいと考えられる。一方で、外来の微生物を加えるため、その安全性について有識者や行政を含めた事前検討が必要と考えられる。(特に単一種の場合、ガイドラインに適合しているかどうかの判断を得る必要がある。経済産業省、環境省、2005、微生物によるバイオレメディエーション利用指針、告示第4号。)

3) MNA(科学的自然減衰)

MNA(Monitored Natural Attenuation)は、油分による地下水汚染に対して適用されるプロトコルである。特に、ガソリンや軽質油は土壌あるいは地下水中に存在する微生物に分解されやすく、時間の経過とともに濃度が減衰していく。このような自然減衰の状況をよく観測し、減衰の時系列的变化、メカニズムおよび将来予測の結果をもとに、積極的な浄化を中止させて状況を観測するというシナリオである。ガソリン漏洩などの一部の地域で観測例が報告されているが、さらにデータの蓄積が求められる。

6. 土壤汚染対策に関わる今後の課題と展望

土壤汚染対策として、リスク管理を基本として今後重点的に対処していくべき技術的、社会的な事項をいくつかあげてみる。また、油土壌汚染に関する対応にみられるように、基準値による規制だけでなく、汚染サイトのリスク評価に基づく自主的な取り組みが求められている。

リスクの側面:一元的な管理基準にとどまらず、人に対する健康影響の程度を定量的に表すことができるリスク(健康リスクあるいは環境リスク)の考え方が重要である。これにより、さまざまな環境施策の意思決定や経済評価も可能となるので、合理的なリスク管理を実施できる。特に、工場や事業所などの自主的な取り組みにおいて有効な方法と言える。

何のための浄化か?:そもそも、土壤汚染の浄化は何のために実施するのか。第一義的には人への健康リスクを軽減し、回避するためである。したがって、リスクの現状レベルと浄化によるリスクの軽減を定量的に把握することが重要である。

本質的な問題:土壌や地下水といった媒体の特殊性を踏まえ、何が本質的な問題であるのか、その結果ど

の程度リスクがあるのか、さらにリスクの軽減や回避の方法はあるのかなど、現場の視点でみきわめることが重要である。

現場主義：法制度やガイドラインのような普遍的な管理基準に加えて、現場の調査や監視を基本とした一品料理的な対応も必要である。まずは現場の状況や特性をよく把握し、事前検討を通じて適切な評価や対策を実施することが重要であろう。

専門家の育成：わが国では、欧米と比べて土壤汚染に関わる専門家が絶対的に不足している。有識者はもとより、行政担当者、事業者、コンサルタント、浄化企業のような、さまざまな分野の専門家を育成することが重要である。土壤汚染では、それぞれの専門性に加えて、社会的、技術的な両側面をもったジェネラリストの育成も不可欠と考えられる。

方法論の標準化：現状の汚染調査・評価では、同様な汚染状況でも個々のケースで異なった結果や対応になることがある。これに対処するため、科学的な地質調査、汚染評価を進めるとともに、方法論の標準化という視点が重要と思われる。わが国でも世界標準的な指針やマネジメントシステムの構築、各種の認定制度や登録制度の確立が必要である。

リスクコミュニケーション：情報の公開はもとより、利害関係者間のコミュニケーションが重要である。大規模な土壤浄化を行う場合では、市民、行政、事業者、浄化企業などによる参加型事業（事前協議、監視、評価）とすることで、よりスムーズな浄化活動が期待される。

合理的な土壤汚染対策：費用対効果の高い浄化対策として、低コストあるいは低環境負荷の浄化技術の開発が求められる。また、汚染物質、汚染の程度、浄化目標などに応じた適切な浄化技術の選択も重要であ

る。特に、汚染状況が軽微な場合では、微生物や鉱物作用といった自然減衰による浄化策もオプションのひとつとなり得る。

7. おわりに

現実には発生している土壤・地下水汚染を科学的、合理的に評価・管理するためには、環境基準値などの法規制に加えて自主的なリスク管理が重要である。特に、近年問題となっている油汚染のように基準値がない物質については、リスク評価による判断基準の導入が不可欠である。筆者らは、油土壌汚染にも適用可能な地圏環境リスク評価システムの研究開発を行っている。本稿では、鉱物油等による土壤汚染対策の問題点および将来の課題の抽出を中心に、最近の研究開発および社会制度の動向を紹介した。また、油土壌汚染の浄化対策に関する技術的な課題を整理し、特に微生物を活用した土壤汚染浄化手法の研究要素について述べた。最後に、土壤汚染問題を合理的に解決するためのリスク管理のあり方について論じた。

参考文献

- 駒井 武 (2003) : 土壤汚染問題とリスクマネジメント, 環境管理, 39 (8), 737-744.
 産業技術総合研究所 (2002) : 土壤汚染リスク管理手法調査報告書, 経済産業省委託事業報告書.
 環境省 (2006) : 油汚染対策ガイドライン.
 全国石油協会 (2004) : SS汚染土壌の浄化技術のパンフレット.
 全国石油協会 (2006) : 油漏洩土壌の評価手法に関する調査報告書-油臭測定と臭気強度評価に関する検討-.

KOMAI Takeshi (2006) : Risk Management of Soil Contamination by Mineral Oils and the Technical Problems of Remediation.

<受付：2006年9月22日>