

産業技術総合研究所における土壤汚染に関わる 分野融合研究の成果 —土壤汚染調査・評価・管理手法の開発—

松永 烈¹⁾・駒井 武²⁾・徳永 修三²⁾・杉田 創²⁾・川辺 能成²⁾
丸茂 克美³⁾・今井 登³⁾・木村 克己³⁾・田尾 博明⁴⁾・中里 哲也⁴⁾
辰巳 憲司⁴⁾・飯村 洋介⁴⁾・澤田 章⁴⁾・福嶋 正巳⁵⁾

1. はじめに

産業活動や様々な人間活動に伴い、土壤や地下水への有害化学物質の排出量が増加し、一部では深刻な土壤汚染や地下水汚染の事例が発生している。特に、事業所や工場における環境マネジメントでは、土壤環境への負荷を低減し、土壤・地下水汚染を未然に防ぐための対策が不可欠となっている(中杉, 2003)。また、土壤汚染の原因の判定や深刻さを適切に評価するためには、地質調査の標準化や土壤中の汚染化学物質の形態分析法の確立といった調査・分析手法の開発が極めて重要である(森澤ほか, 2003)。さらに、土壤汚染による直接的な環境影響として、有害化学物質の人への健康影響、すなわち環境リスクを適切に評価し、リスクを管理するための手法開発が求められている(駒井, 2003)。

産業技術総合研究所では、このような社会的な背景およびニーズに応えるため、2002年度より3年間にわたって「土壤汚染調査・評価・管理手法の開発」に取り組み、環境リスク管理の確立に向けた研究開発を行った。この研究開発では、環境地質、環境工学、地球化学、分析化学、リスク科学などの異分野における多数の研究者が協力体制を組み、目標達成に向けた分野融合型のユニークな取り組みを行った。具体的には、「大都市域における地質調査、形態分析法、修復技術、リスク評価などの技術開発と標準化を分野横断的に実施し、総合的な土壤汚染リスク管

理手法を確立する」を主要な成果目標として掲げた。

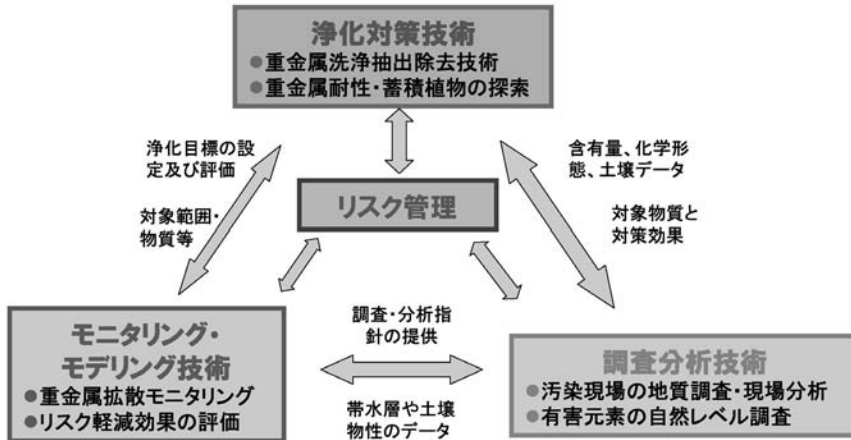
本研究開発において得られた成果は、土壤汚染の調査および分析などの技術開発に適用されるほか、土壤汚染の化学的、生物学的な浄化技術にも反映された。また、土壤汚染のリスク管理手法の研究成果をとりまとめて、土壤汚染リスク評価システムとして完成させ、産業界への普及を図った。本稿では、産業技術総合研究所における土壤汚染関連研究の概要について紹介するとともに、分野融合型の研究開発において得られた主要な成果について紹介する。

2. 土壤汚染対策の課題と取り組み

2003年の土壤汚染対策法の施行に伴い、地圏環境における総合的なリスク管理が重要な課題となっている。このような状況下、土壤・地下水汚染に起因する環境リスクの低減を図るため、土壤汚染サイトの調査・評価・管理技術に関わる幅広い研究開発が要望されている(中島ほか, 2003)。特に、実際の土壤汚染対策では、汚染の顕在化した工場跡地の修復だけでなく、現在操業中の工場のリスク管理という面から、各種産業の環境マネジメントを行う上での基礎として重要である(渡邊, 2003)。また、浄化・修復技術の評価、人や環境へのリスクを低減するための環境管理技術、新たな技術体系(ソフトを中心とした知的基盤)の確立、環境浄化に関する新産業の創出といった様々な側面が求められている。このような土壤汚染

1) 産総研 評価部
2) 産総研 地圏資源環境研究部門
3) 産総研 地質情報研究部門
4) 産総研 環境管理技術研究部門
5) 北海道大学 大学院

キーワード: 土壤汚染, 地下水汚染, リスク管理, 浄化技術, 分析技術



第1図 土壤汚染調査・評価・管理手法の開発の概要とリスク管理への適用。

対策の課題を克服するためには、土壤汚染の調査・評価・管理に関わる総合的な研究開発を実施することが極めて重要と考えられ、総合科学技術会議分野別戦略においても化学物質リスク総合管理研究が取り上げられている。産業技術総合研究所においても、地質分野の研究戦略として土壤・地質汚染への対応が、また環境・エネルギー分野の研究戦略においても有害物質リスク削減技術が重点課題として取り上げられ、水・大気・土壤汚染に係わる環境修復、環境診断へ分野をまたがる融合的な取り組みがなされてきた。

3. 研究開発の概要

本研究開発では、上記のような技術的、社会的な課題を背景に、工場、事業所および市街地における土壤汚染対策として、分野融合型の本格的な取り組みを実施した。具体的な目標としては、大都市域における土壤・地下水汚染に関わる地質調査、直接形態別分析、修復技術、リスク評価などの技術開発を実施し、総合的な土壤汚染リスク管理手法を確立する。このため、産業技術総合研究所では以下に示すような課題を取り上げ、研究開発を推進した。

1) 土壤汚染の調査・分析手法(地質情報研究部門, 環境管理技術研究部門)

土壤汚染地の地質調査・現場分析や、有害重金属の迅速形態分析法を開発し、各種有害物質の3次元

分布様式や土壤・地下水中への拡散状況を解明する。

2) 土壤汚染の地球化学的評価手法(地質情報研究部門)

土壤汚染地周辺地域の広域地質調査と化学分析を実施し、各地質の有害元素の自然レベルを把握するための調査・解析手法を開発する。

3) 土壤汚染の浄化・修復技術

3)-1 電気化学的手法(エレクトロカインエティック)(環境管理技術研究部門)

界面動電現象を利用する汚染土壤の浄化で、土壤pHの変化を制御する新たなシステムを開発し、汚染土壤中の重金属除去効率の向上を図る。

3)-2 植物活用浄化手法(ファイトレメディエーション)(環境管理技術研究部門)

重金属に耐性がありそれを積極的に蓄積する植物を探索し、現場への適用を図る。

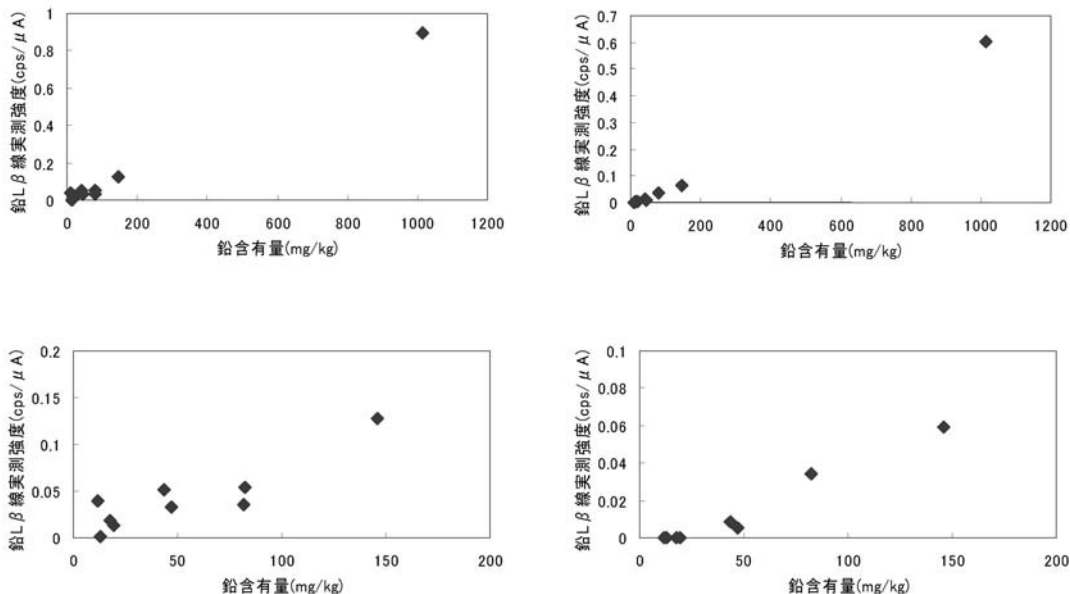
3)-3 洗浄・抽出技術(地圏資源環境研究部門, 環境化学技術研究部門)

重金属の可溶化・移動を促進でき、しかも安全で有害重金属に対する選択性が高い処理剤を開発するとともに、高効率な洗浄・抽出技術を確立する。

4) 土壤汚染のリスク管理手法(地圏資源環境研究部門, 化学物質リスク管理研究センター)

含有量と溶出量を基にした土壤汚染の曝露・リスク評価手法を開発し、浄化・修復のリスク低減効果を定量的に評価できるリスク管理手法を確立する。

第1図は、これらの研究開発の概念図および土壤



第2図 蛍光X線装置における2次フィルターの影響。

汚染のリスク管理に向けた位置づけを示したものである。土壌汚染対策は、調査・分析技術、観測・解析技術および浄化・修復技術の3本柱を基礎にして、リスクの低減あるいは費用対効果の向上といったリスク管理の方法論の確立に集約した。

研究体制としては、産業技術総合研究所内の6つの研究ユニットの連携の下に、分野融合型の研究開発を行った。地質調査および地球化学的なアプローチについては主に地質情報研究部門が担当し、リスク管理手法および化学的浄化手法は地圏資源環境研究部門がこれらを担った。有害重金属の迅速形態分析法および植物浄化や電気化学的手法の開発では、環境管理技術研究部門の多数の研究員が参画した。その他、化学物質リスク管理研究センターおよび環境化学技術研究部門が、上記の研究開発をサポートした。これら6つの研究ユニットに所属する関係者の間で行った数多くの意見交換や、外部研究機関や企業との研究交流会を通じて、土壌汚染問題に対する共通的な認識および情報の共有が可能となり、分野横断の実効性の高い取り組みができたと考える。

4. 研究成果

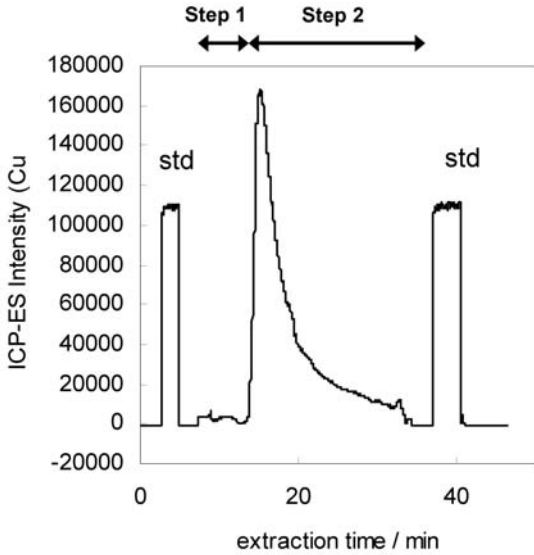
以上に述べた研究開発を2002年より2004年まで

の3カ年にわたり実施した。その結果、以下に述べるような多くの具体的な成果を得ることができた。

1) 地質調査・化学分析手法

東京都江東区東大島および江戸川区小松川周辺地域の土壌・地質調査を行うとともに、江戸川区小松川地区、葛飾区新宿地区、埼玉県彦糸地区のボーリング試料を用いて地層賦存形態に近い還元状態での化学特性の検討を行い、沖積層を対象とした地層堆積環境と無機化学成分との相関性を評価した。その結果、土壌の調査からは過去の影響が認められる高濃度の重金属が存在することが分かった。また、無機化学成分の挙動はその堆積環境と密接な関わりがあり、人為汚染を受けていないと考えられる地層でも、海成層からは自然由来の有害な重金属が溶出することが判明した。さらに、地層の酸化により、より多くの重金属の溶出が予想された。

原位置簡易測定法の開発では、エネルギー分散型蛍光X線装置を用いて実汚染土壌の現場測定を行い、2次フィルターの装着により砒素および鉛について自然由来の汚染と人為汚染とを識別するために求められる環境基準値(10mg/kg)の評価が可能なることを実証した。第2図は、2次フィルター無し(左図)とフィルターあり(右図)の場合の分析結果の差異を示し



第3図 オンライン逐次抽出分析法による土壤中銅の形態分析プロファイル (step 1: acid-soluble fraction, step 2: reducible fraction)。

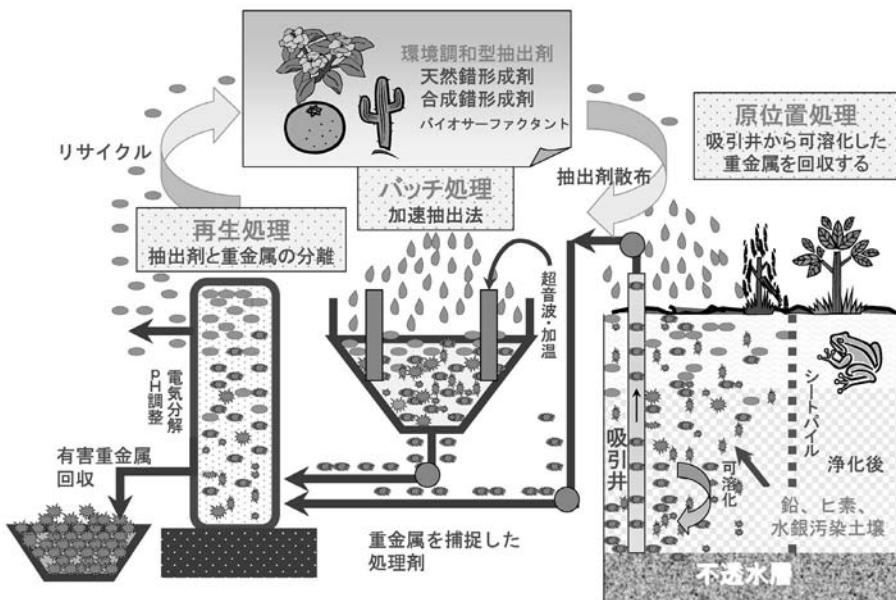
ムに順次流しこみ、土壤に含まれる金属を形態別に抽出し、その抽出液をオンラインでICP発光分析装置に導入し、多波長同時測定法によって各金属の抽出量を連続測定するものである。この測定前後に、希釈液の代わりに各金属の標準溶液(std)を流すことで、形態別に抽出された各金属の濃度を正確に決定することができる。第3図に2種類の抽出剤を用いて逐次抽出条件で得られた銅の濃度曲線(形態プロファイル; acid-soluble and reducible fractions)を示す。本手法の適用により、分析に要する時間を従来法(約35時間)に比べて著しく短縮(約40分)するだけでなく、操作を簡素化することができた。この技術によって、重金属汚染源の特定や汚染除去処理の把握を迅速に行うことが可能となる。現在、従来の長時間・煩雑なバッチ式逐次抽出法に替わる迅速かつ簡便な分析法として普及を図っている。

たものである。

土壤中の重金属を形態別に迅速かつ簡便に分析できるオンライン逐次抽出/誘導結合プラズマ分光分析法を開発した。本法は、カラムに詰めた土壤試料にマイクロ波を照射しながら、還元剤および酸化剤などの複数の抽出剤を互いに接触させないようにカラ

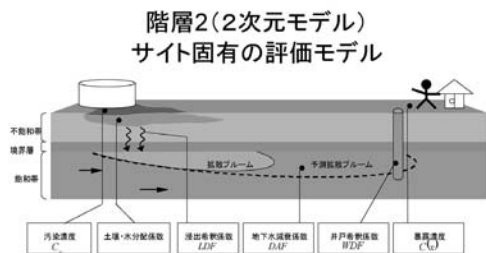
2) 浄化・修復技術

界面動電法の開発では、電解槽のpH制御が土壌内のイオン濃度差と電位勾配に与える影響について評価した。pHを制御した場合、電位勾配が生じない平坦な領域や土壌内のイオン濃度の低下が認められず、汚染物質の移動に関する電気泳動や電気浸透流を安定化させることを明らかにした。また、ヒ素汚染土壌浄化に関しては、従来の方法では数%しかヒ素を除去できなかったが、pHを中性に調整した2%リ



第4図 抽出法による土壤汚染浄化の概念図。

地圏環境評価システム (GERAS) の構成



土壤汚染現場の
リスクを科学的、
客観的に評価

第5図
土壤汚染評価のための
サイトモデルの概要(地圏環境
評価システムGERAS-
1&2).

ン酸を電気泳動で負極から送り込むことによって、ヒ素濃度850mgkg-1程度の汚染した黒ボク土から約60%のヒ素が除去できることを明らかにした。

抽出法による土壤汚染浄化の概念を第4図に示す。水銀汚染土壌については、酸性ヨウ化カリウム溶液が水銀の抽出除去に有効であることを認めた。また、鉛、カドミウムなどの重金属汚染土壌についてはクエン酸などの天然有機酸、サポニンなどのバイオサーファクタント、アクリル酸重合体などの合成錯形成剤が重金属の抽出除去に有効であった。さらに、ヒ素、セレンなどの半金属化合物については、リン酸塩水溶液、リン酸水溶液などが高い抽出除去効果を示し、民間企業との共同研究でその有効性を実証した。

植物を用いる浄化法(ファイトレメディエーション)の開発では、企業との共同研究において、カドミウムを含有する実汚染土壌を用いてハイパーアキュムレーターのスクリーニングを行った。数種類の有望な植物を見い出し、実用化を目指した実証試験を進めている。

3) リスク管理手法

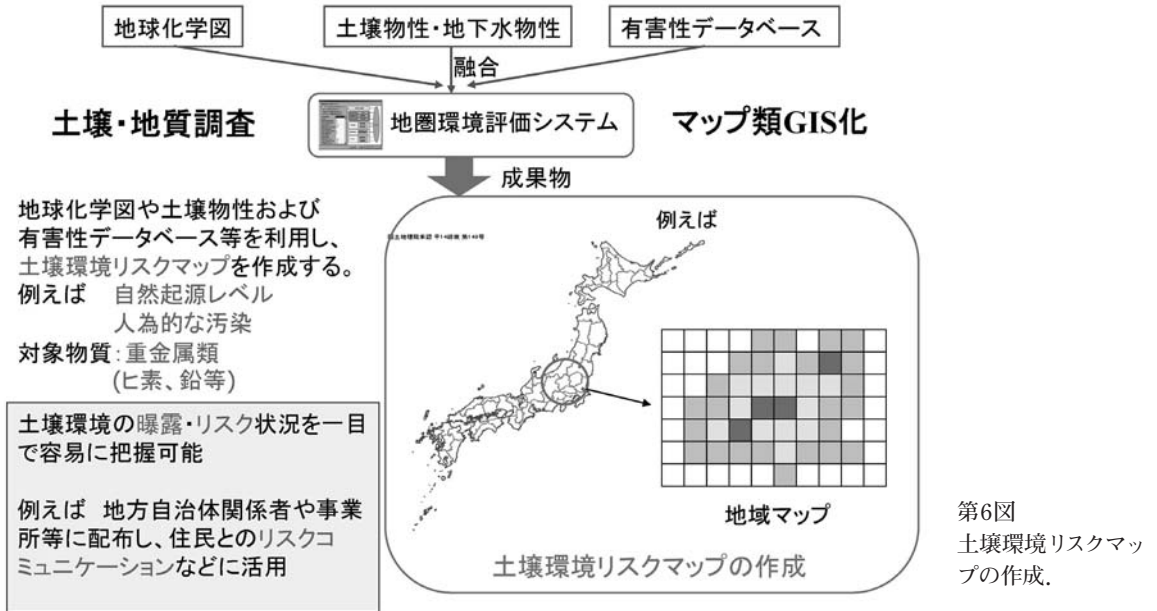
サイト毎の特性を反映した土壌・地下水の汚染評価手法として、サイトモデルの設計および作成を行った。汚染された土壌および地下水、その周辺の環境媒体における汚染物質の移動や反応、自然減衰など

をモデル化し、曝露とリスクの定量的な評価が可能となるようにモデルを構築した。

サイトモデルを含む地圏環境評価システムの概要を第5図に示す。本研究では、まず評価システムに必要な汚染土壌からの有害化学物質の溶出、土壌への吸着性などに関する環境パラメータを取得した。サイトモデルでは、汚染物質としての特徴を考慮して、重金属類と有機化合物で別の解析モデルを作成し、環境中の挙動や人への曝露などを数値的に表現した。また、それぞれの汚染物質について環境中の特性、移動性、吸着性、自然減衰などをデータベース化し、解析モデルに組み込んだ。さらに、作成したサイトモデルを用いて、実際に汚染されたサイトの評価を行い、曝露とリスクの解析および修復効果の定量的な評価を実施した。今回開発したサイトモデルは、土壌や地下水の特性や汚染物質に関するデータを含めて公開し、工場などの地圏環境問題に適用する予定である。

5. 成果の普及と今後の課題

都市部の工場跡地の再開発は急務であるが、工場跡地に分布する有害物質は国民の健康被害をもたらすため、土壤汚染を迅速に把握し、修復することが不可欠である。2003年に施行された「土壤汚染対策法」は、適切な土壤汚染調査や修復・モニタリング技術の開発を求めている。



わが国では、地圏環境リスク管理システムの開発を目指した研究開発は初めての試みであり、特に汚染の調査・モニタリング技術、浄化・処理技術からのフィードバックを含む有害化学物質のリスク削減と対策技術の費用対効果を統一的手法で表現する点で新規性があった。これまで、地質調査、汚染評価、浄化・修復技術およびリスク評価は、それぞれ個別の分野で実施され、関連性は少なかったが、土壤汚染のような複雑な問題を取り扱うために、産総研内の関連する研究グループが参集して融合して研究を進められたことは有意義であった。また、土壤汚染対策法の施行によって、土壤汚染の調査・対策に関わる総合的な取り組みが必要と考えられている割には、国としての組織だった研究開発への予算が乏しい中で、産業技術総合研究所の政策的予算(重点研究課題)として3年間にわたり継続的な研究を進めることができたことも、問題の解決に非常に効果があったと考える。

個別の技術開発については、モニタリング技術や浄化・処理技術においては実用化を目指した企業との共同研究へと進んでおり、今後の展開が期待されることである。また、リスク管理システムについても、土壤汚染によるリスクを科学的に解析・評価する基本構成に加えて、対策技術によるリスクの低減効果の評価、使用するパラメータ類のデータベース、代表的

な汚染サイトの評価事例などの取り込みが進められている。

本研究で開発されたリスク評価システムのサイトモデルは、専門家の評価を受けた後に公開され、数多くの事業者や工場などに配布されている。現在、環境リスクマネジメントを中心とする土壤・地下水汚染対策の実務に活用されている。なお、リスク評価システムの開発の研究では、詳細モデルの開発に向けて地圏資源環境研究部門の重点研究課題として引き継がれ、活発な研究活動が継続されている。

また、土壤・地質汚染基本調査および上記のリスク評価システムを融合して、第6図に示すような土壤環境リスクマップの開発を進めている。この研究では、各地で採取した土壌試料を分析し、溶出量や含有量などに関するデータを解析する。これらに土壤の特性、土地利用や地下水の摂取などの曝露に関する分析を加えてリスクを算定し、マップ化を試みている。さらに、大学や企業との産学官連携の下で、地圏環境インフォマティクスのシステム開発を行っている。この研究開発では、土壤、地質の各種データに加えて、地形、鉱床、土地、植生などの様々な地圏情報をGIS化し、全国レベルで利用可能にすることを目指している。

本研究の成果をもとにして、総合的かつ実用的な土壤・地質汚染地の調査・分析技術、モニタリング技

術、修復技術が確立できれば、工場跡地などの迅速かつ合理的な再開発による経済効果が大きいだけでなく、都市地域を中心に国民の安全・安心な社会構築への意義も大きい。

6. まとめ

2002年度より開始された分野融合型重点研究課題「土壤汚染調査・評価・管理手法の開発」の概要を紹介し、産業技術総合研究所における多様な土壤汚染対策の研究開発の概要および成果について述べた。この研究開発では、地質、環境、資源、分析化学、リスク科学などの分野横断的な研究員の協力・連携の下に、目標達成に向けた集中的な取り組みが実施された。その研究成果は、土壤汚染の調査・分析、観測・解析、浄化・修復などの要素技術の開発および普及に大きく寄与するだけでなく、リスク管理に向けた総合的な対応を可能にした点で重要な進捗が得られた。特に、産業界へのリスク評価システムの普及や調査・分析手法の開発・提案などは、具体的な成果として特筆されるべきものである。

7. 主な成果発表

本研究によって得られた主な研究成果は、以下のとおりである。原著論文および国際集会発表の他に、土壤リスク評価システムのソフトウェアおよびデータベースとして製品化された。

(1) 原著論文等

- 原 未来也・内山美恵子・竹内美緒・木村克己 (2004) : 東京低地小松川サイト (GS-KM-1C) における沖積層のイオン濃度変化特性. 2004年地球惑星合同大会.
- Kajita, S., Sugawara, S., Miyazaki, Y., Nakamura, M., Katayama, Y., Shishido, K. and Iimura, Y. (2004) : Overproduction of recombinant laccase using a homologous expression system in *Coriolus versicolor*, *Appl Microbiol Biotechnol*, 66, pp.194-199.
- 川辺能成・駒井 武 (2004) : わが国における土壤中有機化合物の暴露量推定-地圏環境評価システムの開発に関する研究. 資源・素材学会誌, 121, 11, pp.19-27.
- Kawabe, Y., Komai, T. and Sakamoto, Y. (2004) : Risk assessment of cadmium and nickel containing in soil and groundwater environment in Japan. *Proc. 2nd International Workshop on Water Dynamics*.
- Komai, T. and Kawabe, Y. (2004) : Risk assessment methodologies of hazardous chemical substances in subsurface environment, *Proc. 2nd International Workshop on Water Dynamics*.

- 駒井 武 (2004) : 土壤汚染の調査・評価手法とリスクマネジメント, 環境工学連合会講演会論文集, 20, pp.1-6.
- 駒井 武 (2004) : 土壤汚染のリスクマネジメント, ケミカルエンジニアリング, 49, 5, pp.329-335.
- 駒井 武 (2004) : 土壤汚染対策とリスク管理, 新政策, 16, 6, pp.20-22.
- 駒井 武 (2004) : 土壤・地下水汚染のリスク管理のあり方, 土壤環境ニュース, 33, pp.2-3.
- 丸茂克美・氏家 亨・江橋俊臣 (2005) : エネルギー分散型蛍光 X線分析装置による土壤中の砒素・鉛含有量評価, X線分析の進歩, Vol.36, pp.17-36.
- Nitta, Y., Miyazaki, Y., Nakamura, M., Iimura, Y., Shishido, K., Kajita, S. and Morohoshi, N. (2004) : Molecular cloning of the promoter region of a gene for glyceraldehyde-3-phosphate dehydrogenase for construction of an effective transformation system in the white-rot fungus *Coriolus versicolor*, accepted in *Mycoscience*, 45, pp.131-136.
- Sonoki, T., Kajita, S., Ikeda, S., Uesugi, M., Tatsumi, K., Katayama, Y. and Iimura, Y. (2005) : Transgenic tobacco expressing, fungal laccase promotes the detoxification of environmental pollutants. *Appl Microbiol Biotechnol*, (in press).
- Sawada, A., Mori, K., Tanaka, S., Fukushima, M. and Tatsumi, K. (2004) : Removal of Cr (VI) from contaminated soil by electrokinetic remediation, *Waste Management*, 24(5), pp.483-490.
- Sawada, A., Fukushima, M., Tanaka, S., Kimura, T. and Tatsumi, K. (2005) : Effect of the control of soil pH for removal of heavy metals from clayey soil by electrokinetic remediation, submitted.
- 田中俊逸・澤田 章・木村智之・照井教文 (2004) : 電気化学的手法による汚染土壌の修復, ケミカルエンジニアリング, 49 (5), pp.33-39.
- Nakazato, T., Akasaka, M. and Tao, H. (2006) : A rapid fractionation method for heavy metals in soil by continuous-flow sequential extraction assisted by focused microwaves, *Analytical and Bioanalytical Chemistry*, (in press).
- Tao, H., Nakazato, T. and Akasaka, M. (2005) : On-line coupling of microwave-accelerated sequential extraction and inductively coupled plasma atomic emission spectrometry for metal fractionation in environmental samples, *Pacificchem 2005, Hawaii*.
- Tokunaga, S. and Alam, M.G.M. (2004) : Removal of Cr (VI) from contaminated soils by extraction, *Procs. 4th Intern. Conf. on Remediation of Chlorinated and Recalcitrant Compounds*.
- Tokunaga, S., Amano, T., Seo, A., Homma, N., Kato, Y., Katono, A. and Onuki, K. (2004) : Remediation of arsenic-contaminated soils by flushing technology, *Procs. 4th Intern. Conf. on Remediation of Chlorinated and Recalcitrant Compounds*.
- Tokunaga, S. and Kunishige, S. (2004) : Remediation of organoarsenic-contaminated soil by washing process, *Procs. 1st Int. Conf. on Environ. Sci. and Technol.*
- Tokunaga, S., Park, S.W. and Ulmanu, M. (2005) : Extraction behavior of metallic contaminants and soil constituents from contaminated soils, accepted in *Environ. Technol.*
- 徳永修三・国重誠司・加藤洋一 (2004) : 有機ヒ素汚染土壌の浄

化技術の開発, 土壤環境センター技術ニュース, 9, pp.54-55.

寺島 滋・今井 登・太田充恒・岡井貴司・御子柴真澄 (2004): 関東平野南部における土壤の地球化学的研究-土壤地球化学図の基礎研究(第5報)総括-, 地質調査研究報告 55, pp.1-18.

(2) ソフトウェア・DB

川辺能成・駒井 武 (2005): 地圏環境評価システム GERAS-1&2 (有機化合物) の開発, 産業技術総合研究所ソフトウェア登録.

川辺能成・駒井 武 (2005): 地圏環境評価システム GERAS-1&2 (重金属等) の開発, 産業技術総合研究所ソフトウェア登録.

謝辞: 本研究開発を実施するにあたり, 各研究ユニットの研究員, 特別研究員 (PD), テクニカルスタッフの皆様にご多大なる貢献をいただきました。この場をかりて深く御礼申し上げます。

引用文献

中杉修身 (2003): 土壤汚染対策法と今後の課題, 土木技術, 58, 10.

森澤眞輔・米田 稔・坂内 修 (2003): 土壤・地下水汚染のモニタリング手法, 安全工学, 42, 6, pp.375-382.

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.

中島 誠・武 暁峰・前川統一郎 (2003): 土壤汚染による環境リスクの評価と対策検討の事例, 環境科学会化学物質管理戦略研究会.

渡邊 格 (2003): 土壤汚染リスクとサイトアセスメント, 環境管理, 39, 8, 760-764.

MATSUNAGA Isao, KOMAI Takeshi, TOKUNAGA Shuzo, SUGITA Hajime, KAWABE Yoshishige, MARUMO Katsumi, IMAI Noboru, KIMURA Katsumi, TAO Hiroaki, NAKAZATO Tetsuya, TATSUMI Kenji, IIMURA Yousuke, SAWADA Akira and FUKUSHIMA Masami (2006): Research on Risk Management of Soil Contamination in AIST, Development of Survey, Assessment and Remediation Methodologies for Soil Contamination.

<受付: 2006年11月6日>