

土壌・地下水汚染問題の解決に挑む

— 学際融合研究 —

張 銘

土壌・地下水汚染は人の健康や社会経済的活動に密接に関連し、大きな影響を与えるため合理的な対策措置が必要不可欠である。多様化・複雑化する土壌・地下水汚染問題を解決するためには、汚染物質の種類や存在形態等を調査・評価する技術、汚染を浄化・対策する技術、ならびにリスク評価・管理技術に係る要素技術の開発のみならず、環境・社会および経済的側面を統合的に考慮した実社会への橋渡しも極めて重要である。この論文では、土壌・地下水汚染問題に係る研究対象、要素技術および社会実装に向けたシナリオの構成を論説し、著者が携わってきた幾つかの研究トピックスを紹介するとともに、今後の展望を試みる。

キーワード: 土壌・地下水汚染、浄化技術、環境規制、持続的発展

Challenges of solving the problem of soil and groundwater contamination

—An interdisciplinary approach—

Ming ZHANG

Feasible countermeasures are needed to address soil and groundwater contamination problems, because of its impact on human health and socioeconomic activities. Soil and groundwater contamination is a complex issue that requires an interdisciplinary effort involving research into contaminants, their practical removal, and social implementation. This paper discusses several areas of research that the author has been involved in this regard.

Keywords: Soil and groundwater contamination, remediation technologies, environmental regulation, sustainable development

1 はじめに

土壌・地下水汚染は、“古くて新しい環境問題”である。古くは「足尾鉍毒事件」、近年では福島第一原子力発電所事故による放射能汚染や豊洲新市場予定地の土壌汚染等が挙げられる。土壌・地下水汚染は各種産業活動の“負の遺産”とも言え、時代や産業構造等によって変わってきており、また規制のあり方に関しても、政策や文化の変遷に伴い、変化してきている。

わが国では、19世紀後半からの重工業の発達に伴って鉍山開発と精錬等の産業が盛んになり、鉍山排水による農地の汚染が深刻な社会問題となった。1880年代後半から渡良瀬川沿岸の農地が汚染された公害事件（通称足尾鉍毒事件）は、わが国の公害の原点となった。また、1968年富山県神通川流域で発生したイタイイタイ病をきっかけに、1970年に「農用地の土壌の汚染防止等に関する法律」が制定された。2016年12月に環境省水・大気環境局が

公表した報告によれば^[1]、平成27年度末時点で、法律で定められた基準値以上検出された地域面積は7,592 haにのぼり、その内対策事業等完了面積は割合にして92.7%であった。このように、農地の土壌汚染問題は発覚から50年以上にわたる対策を実施してもいまだに100%でないのが現状である。「農用地の土壌の汚染防止等に関する法律」に指定された汚染物質は3種類のみであり、カドミウムは人への健康被害、銅とヒ素は植物への生育障害防止という観点から規制されている。2014年12月に、日本のコメ中のカドミウムの基準値は、1.0 mg/kgからWHO基準と同じ0.4 mg/kgに改正された。基準が上がったので、今後一部の地域で問題が顕在化する懸念も残ると考えられる。

戦後、化学や製造業の発達に伴い、鉛や六価クロム等の重金属類や揮発性有機化合物（以下、VOC）による汚染等が顕在化した。2000年に土壌環境センターが公表し

産業技術総合研究所 地質調査総合センター 地圏資源環境研究部門 〒305-8567 つくば市東 1-1-1 中央第7
Research Institute for Geo-Resources and Environment, GSJ, AIST Tsukuba Central 7, 1-1-1 Higashi, Tsukuba 305-8567, Japan E-mail: m.zhang@aist.go.jp

Original manuscript received January 6, 2019, Revisions received January 22, 2019, Accepted January 24, 2019

た報告書によれば、汚染の恐れのある全産業事業所数は約 93 万カ所、調査費用は約 2 兆円、浄化費用は約 11 兆円が必要と推定された^[2]。わが国では、市街地の土壌汚染に係る法整備は、米国の汚染土壌浄化費用の信託基金（通称スーパーファンド法、1980 年に制定）より 20 年以上も遅く、2003 年に「土壌汚染対策法」（以下、土対法）が制定された。この法律により、汚染物質は第 1、第 2 および第 3 種特定有害物質に分類され、それぞれ VOC、重金属類^{用語 1}、および農薬類と PCB に対応する。土対法は数回の改正を経て、現時点で、第 1、第 2 および第 3 種特定有害物質はそれぞれ 12、9 および 5 物質（合計 26 物質）が指定されている。特定有害物質は、日本で使われている約 6 万 5 千種類の化学物質の極一部しかないことに留意されたい。また、現状のわが国の環境規制はリスクに基づくものではなく、一律の環境基準値によるものであることにも留意されたい。

土対法の施行をきっかけに、わが国における土壌汚染の調査と対策の事例が年々増加している。環境省水・大気環境局が公表した最新の報告によれば、近年法規制に基づく調査・対策が実施された件数だけで年間約 1200 件、企業等の自主対策も含めると数千件にのぼる^[3]。しかし、汚染サイト数は数十万カ所も潜在するのに対して、数千件はわずか 1% 程度であり、土壌・地下水汚染問題を解決するためには、長い道のりが必要であることが一目瞭然である。

この論文では、土壌・地下水汚染問題の多様性と複雑性を提示し、土壌・地下水汚染問題を合理的に解決するための要素技術および社会実装に向けたシナリオを構成・論説するとともに、著者が携わってきた幾つかの研究事例を紹介する。

2 土壌・地下水汚染の多様性と複雑性

「土対法」に指定された汚染物質は 3 種類で、26 物質のみであるが、実際に人の健康に影響を与える可能性のある汚染物質は他にも多数存在する。ヨーロッパでは、汚染物質を重金属類、芳香族炭化水素（以下、BTEX）、有機塩素化合物（以下、CHC）、多環芳香族炭化水素（以下、PAH）および鉱物油に分類されている^[4]。日本では、「油汚染対策ガイドライン」が発行されているものの、法律による規制はまだ実施されていない^[5]。また、BTEX や CHC および PAH にはそれぞれ多数の異性体が存在するが、土対法で指定された VOC は、BTEX そして CHC の一部のみである。

2011 年 3 月 11 日に発生した東日本大震災によって引き起こされた福島第一原子力発電所事故により、広範囲にわたる放射性物質汚染が発生した。この喫緊の問題を解決

するために、同年 8 月 30 日に「平成二十三年三月十一日に発生した東北地方太平洋沖地震に伴う原子力発電所の事故により放出された放射性物質による環境の汚染への対処に関する特別措置法」が公布され、2012 年 1 月 1 日より施行された。すなわち、放射性物質による汚染は、土対法の規制の範疇外である。

2016 年 6 月 1 日より改正「労働安全衛生法」が実施され、化学物質に係るリスクアセスメントの実施が義務化された。同改正では、一定の危険性・有害性が確認されている 640 の対象化学物質を製造、または取り扱う事業者に対して、業種や規模を問わず、リスクアセスメントを実施することが義務付けられた。また、水道法に基づく水質基準では、51 ある規制項目のほか、26 の水質管理目標設定項目と 47 の要検討項目（合計 124 項目）も指定されている。このように、土対法で規制されている化学物質の種類は限られた数しかない。これは、土壌汚染問題は非常に複雑であり、調査と対策は容易ではなく、現実的に厳しい規制が困難であることが伺える^[6]。現時点で、土対法に規制されていない物質が今後規制される可能性もあり、場合によっては、社会問題になる可能性もあり得る。実際に 2017 年 4 月よりクロロエチレンが土対法の規制物質として追加され、汚染のない土地が法律上では、汚染された土地に変わり、売却や再開発ができなくなったケースも発生した。

汚染物質の多様性に加え、土壌の多様性やその不均質性と異方性、有機物と粘土鉱物の強い吸着性等により、土壌汚染問題は非常に複雑になる。また、汚染物質によっては、自然界の物質循環によって汚染が連鎖的に発生する場合もある（図 1）。環境基本法では、土壌汚染を大気汚染、水質汚濁、騒音、振動、地盤の沈下および悪臭と並べて、「典型七公害」の一つとして位置付けられている。



図1 物質循環による各種汚染の連鎖作用

これらの公害は単独で発生するのではなく、原因によっては同時に発生する可能性もある。例えば、異臭のある揮発性化学物質は悪臭のほか、大気汚染、降雨による水質の汚濁および浸透による土壌・地下水の汚染を同時引き起こす可能性もある。このように、土壌・地下水汚染問題を調査・対策するためには、多分野に跨る知識と技術の融合は必要不可欠である。

3 土壌・地下水汚染に係る研究の構成学的意義

土壌・地下水汚染のリスク評価技術と自主管理手法に関する構成学的意義は、駒井ら^[7]によって論じられているが、多様化・複雑化する土壌・地下水汚染問題を解決するためには、リスク評価技術と自主管理技術が必須であるものの、それだけではまだ不十分である。多様化・複雑化する土壌・地下水汚染問題を合理的・効率的に解決するためには、汚染物質の種類や存在形態を適切に調査・評価する技術や、低コスト・低環境負荷での浄化・対策技術、そしてリスク評価に基づくリスクコミュニケーション等の技術を体系的に開発する必要がある。さらに、科学・技術研究をエンジニアリング的な工法を介して、社会への橋渡しまで持っていく必要もある。実問題への適用においては、環境の側面だけでなく、経済および社会的側面も統合的に考慮する必要がある。汚染対策措置の選択に係る意思決定のプロセスにおいて、要素技術が意思決定の科学的根

拠の一部として取り込まれ、柔軟に統合される。これは、持続的発展を考慮した合理的土壌・地下水汚染対策措置と言ひ、サステナブル・レメディエーションとも称される^{[8]-[10]}。

図2に持続的発展を考慮した合理的な土壌・地下水の汚染対策措置のシナリオをまとめる。技術の社会実装においては、産・学・官連携のみならず、地域住民を含むステークホルダー全員の参加も重要であり、日本では発展すべき課題の一つでもある。豊洲新市場予定地の土壌汚染問題で社会的混乱を引き起こした原因の一つに、ステークホルダーの参加が欠けたことがある。

土壌・地下水汚染の調査・評価技術、浄化・対策技術およびリスク評価・管理技術にはそれぞれ複数のアプローチと研究課題がある。図2に示しているのは、その代表的なもののみである。これら技術の開発には多分野に跨る知識が必要不可欠であり、表1に各種技術開発の目的と主な専門分野を示す。このように、土壌・地下水汚染問題に係る研究はサイエンス、エンジニアリングおよび社会経済学に跨る学際融合研究である、単一分野の知識で解決できない複雑な社会問題である。

4 土壌・地下水汚染に係る戦略的技術開発

土壌・地下水汚染の調査と対策に係る各種技術開発は発展してきているものの、関連知見に対する誤解や実問題への適用に限界がある等の問題が存在する。現状の「土

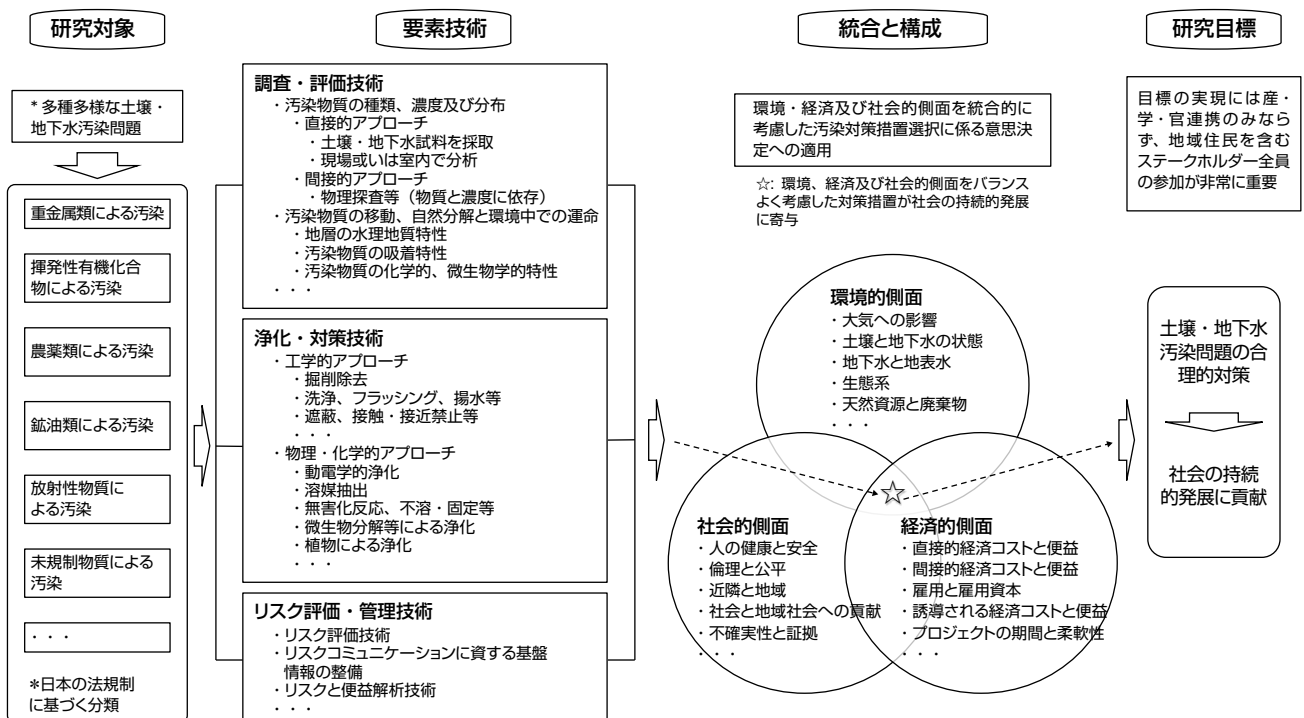


図2 持続的発展を考慮した合理的土壌・地下水汚染対策措置のシナリオ

表1 土壌・地下水汚染研究開発に係る主な専門分野

要素技術分類	目的と関連の専門分野
調査・評価技術	目的：問題の理解と実態把握
	・調査：化学・土壌化学・有機化学・微生物学・機器分析・物理探査... ・評価：水文地質学/水理地質学・数理学...
浄化・対策技術	目的：汚染による人への健康リスクをいかに低減させるか
	・浄化対策：化学工学・電気化学・地球化学・環境微生物学・環境工学... ・管理措置：土木工学・水理地質学・環境経済学・社会経済学...
リスク評価・管理技術	目的：科学的根拠に基づくリスクコミュニケーションの円滑な実施
	・リスク評価：土壌物理学・数理学・毒性学・生態学... ・リスクコミュニケーション：社会心理学・政治哲学・倫理学...

対法」に基づく調査と対策は強制力が強いものの、必ずしも科学的・合理的ではない。例えば、汚染の恐れのある区域に対して、平面方向で試料採取は一律 10 m、対策も 10 m の間隔の格子線で区画される 100 m² が基本単位となっている。実際に鉛等の重金属類で汚染された場合、土壌の吸着性により、10 m より狭い範囲に存在するケースが多いので、100 m² 単位で対策するのは非経済的である。また、現状の土対法では一律の環境基準値で行われているため、実際に人への健康リスクが大きくなって汚染と指定されるケースもあれば、指定調査機関¹¹⁾の分析で環境基準値以下であれば、汚染はないあるいは浄化完了となる。実際に、汚染物質や土質および現場の地質条件等にもよるものの、異なる指定調査機関が分析すれば、環境基準値以上になる可能性もある。これは、分析の対象や方法によって精度が変わること、そして、分析者の経験によるところもあるからである¹¹⁾。このような背景を踏まえ、著者が所属する地圏環境リスク研究グループは、企業や事業所等における自主調査と対策への支援や今後の規制のあり方の変化をも見据えた戦略的研究開発を実施している。ここで、著者が携わってきた幾つかの研究トピックスを紹介する。

4.1 調査・評価に関する技術開発

土壌は複雑なシステムを持つ媒体であり、汚染土壌の分析結果は採取場所や採取方法、前処理、分析方法および分析機器等に依存する¹²⁾。土対法に基づく分析は、「公定法」と言い、評価されるものは分析結果だけであり¹¹⁾¹³⁾、汚染物質の存在形態や浄化・対策技術の選択等に参考となるメカニズムの検討は行われない。例えば、重金属類に関しては、「含有量」と「溶出量」の両方の基準が設けられている。含有量試験は、0.1 mol/L 塩酸抽出法が採用されている。この試験法で“真”の“全含有量”の評価はできないが、専門家でも“全含有量”と誤解するケースがある。この誤解のもとで適切ではない対策方法を選択してしまうと、失敗につながる可能性もある。特に、自然由来の汚染

土壌の場合、一般的に公定法に基づく含有量は低く、溶出量が高い特徴がある。この種の汚染土壌を浄化しようとした場合、繰り返して洗浄しても環境基準値以下にならない可能性がある。これは、真の全含有量が公定法の分析値よりはるかに高いからである。

このような問題を解決するために、著者および共同研究者らは、汚染物質の存在形態に着目した評価法の開発を進めている。例えば、自然由来の汚染物質としてよく存在する鉛汚染土壌に対して、沈降分級と X 線回折分析を用いた鉛含有鉱物の存在状態の解明と簡易定量分析法を確立した¹⁴⁾。分級した各粒径毎の試料を Thermo 製の携帯型蛍光 X 線 (XRF) 分析計 (Niton XL 3t-900S-M) を用いて全岩化学分析を行った。各試料と標準試料 (金属シリコン) の重量比が 1:1 の混合試料を作成し、リガク製の粉末エックス線回折装置 (Smart Lab) を用いて、各鉱物相の同定およびそれらの簡易定量分析を行った。試料に含まれる鉱物相の定量分析は、標準試料の回折ピークの積分強度を 50 として、未知試料の相対量を算出した。某サイトから採取してきた二つの試料の評価に適用したところ、一つの試料では、鉛濃度が粒子の大きさと正の相関があり、方鉛鉱の含有量とも良い相関が認められた。もう一つの試料では、鉛濃度が逆に粒子の大きさと負の相関があり、明ばん石の含有量と正の相関が認められた (図 3)¹⁴⁾。土壌汚染分野においては、分級洗浄という工法があり、よく利用されている浄化工法の一つである。この工法は、汚染物質が粘土物質を多く含み、比表面積の大きい微粒子に附着すると仮定して行われている。しかし、実際の汚染土壌については、この仮説が必ずしも成立しない。このように、汚染物質の粒子サイズと鉱物含有量との相関性は、汚染物質の濃度だけでなく、どのような浄化あるいは対策方法が適用できるかの判断材料としても利用可能である。

4.2 浄化・対策に関する技術開発

汚染の浄化・対策の技術として、工学的アプローチと物

理・化学的アプローチがあり、それぞれのアプローチにはさらに複数の工法が存在する(図2)。しかし、浄化の確実性等からこれまで報告された事例のほとんどは掘削除去等のコストが高い工法を採用してきた^[3]。豊洲新市場予定地の汚染対策には860億円が投じられたが、最終的には完全浄化できなかつたと報じられている。したがって、低コスト・低環境負荷での浄化・対策技術の開発は依然として優先順位の高い研究課題である。地圏環境リスク研究グループは、鉱物系材料^{[15]-[17]}や環境微生物^{[18]-[20]}を利活用した浄化技術の開発を精力的に推進している。前者はヒ素等の重金属類の吸着と不溶化、後者はVOCの分解に利用することが可能である。加筆すべきポイントとして、吸着は単なる汚染物質の濃度変化だけではなく、使用済吸着材の環境安定性^[15]や土壌の種類および土壌中に存在するケイ酸の影響^{[16][17]}も詳細に評価できることである。ここでは、酸性で有機成分に富む黒ぼく土、弱酸性の黄褐色森林土、中性でアロフェン(火山灰地帯に幅広く分布する結晶度の低い水和アルミニウムケイ酸塩でできた粘土)含有量の高い鹿沼土、アルカリ性でシリカ成分含有率の高い川砂および鉄成分含有率の高い山砂を、主要な土壌の種類として、体系的に評価した。また、微生物を利活用したVOCの分解については、単一の汚染物質ではなく、実際の汚染現場で発生する複合汚染を再現した条件下での分解実験を実施した^{[18][19]}。さらに、複合汚染の分解において、どの微生物がどの汚染物質の分解に寄与したかを安定同位体プロービング法で明らかにした^[20]。これら研究開発の全ては実用化を見据えた上で実施している。

図4にテトラクロロエチレン(PCE)、トリクロロエチレン(TCE)、シス-1,2-ジクロロエチレン(*cis*-DCE)、クロロエチレン(VC)、ベンゼン、トルエンおよびジクロロメタン(DCM)の7種を対象とした分解実験の結果を示す。この7種類の汚染物質を選択した理由として、国内で実

在した某不法投棄サイト(廃棄物総量150万t以上、広さ27ha)の調査結果を利用できたからである。図中の(a)と(b)はそれぞれ異なった試験条件下での結果を示している。(AN)/AEは嫌気分解実験後の好気分解実験、(AN)/AE-〇〇/ANは嫌気分解実験、好気分解実験後にさらに嫌気分解実験を行ったことを意味する。また、O21とO5はそれぞれ酸化分解試験における試験瓶ヘッドスペース中の初期酸素濃度を示すものであり、それぞれ体積割合が21%と5%に対応する。DOは溶存酸素の濃度である。好氣的微生物による酸化分解(好気分解とも略称)と嫌氣的微生物による還元分解(嫌気分解とも略称)を柔軟に適用することにより、酸化条件では、ベンゼン、トルエンおよびDCMの分解が確認され、また還元条件では、PCE、TCE、*cis*-DCE、VCおよびDCMの分解が確認された。VCは無害なエチレンまでに分解され、クロロエチレン類の完全分解が確認できた。また、この研究により偏性嫌気性細菌として知られている*Dehalococcoides*は、好気環境に一定期間曝されても生存できクロロエチレン類の分解が可能であることが初めて実証された。今後の複合汚染浄化の設計において非常に有用な知見を得ることができた。

4.3 リスク評価・管理に関する技術開発

リスク評価と管理技術を社会へ適用・実装するためには、リスクコミュニケーションを介して実施する必要がある。リスクの度合いを分かりやすく示す、あるいは理解を得るためには、我々の身近にある自然環境中のバックグラウンドレベルの提示が極めて有効である。重金属類の汚染に係るリスクコミュニケーションや次世代の土地利用計画等に資するため、地圏環境リスク研究グループでは表層土壌における重金属類を含む各種元素の含有量、溶出量および地域の産業構造と住民の生活スタイルを考慮したりリスク評価マップを「表層土壌評価基本図」として整備して

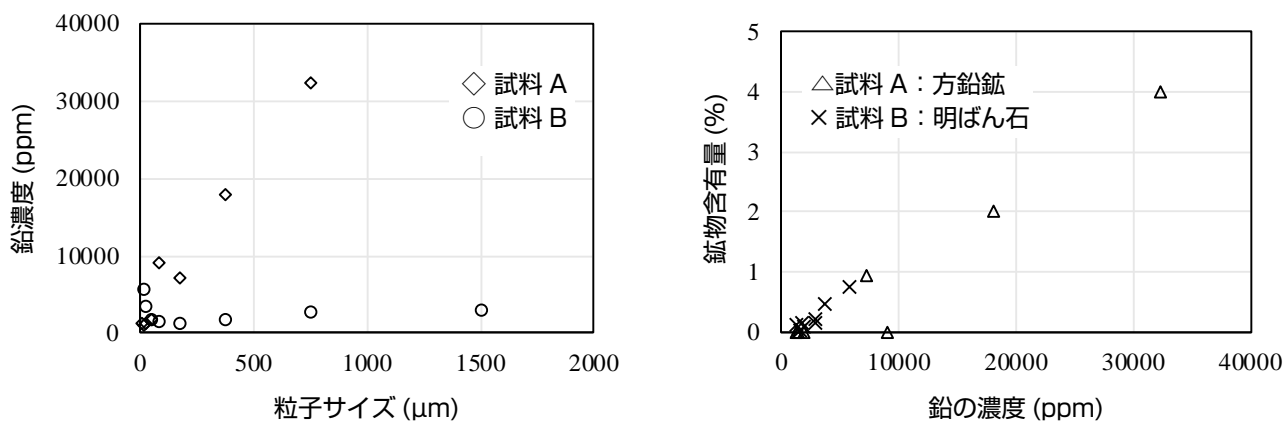


図3 自然由来汚染土壌試料における鉛濃度と粒径および鉱物含有量との関係

きている。これまでに、宮城県、富山県、鳥取県、茨城県および高知県地域の整備が完了し、Webで公表している (<https://unit.aist.go.jp/georesenv/georisk/japanese/>

home/home_map.html)。一例として、図5にGoogle Earth 上に表示した高知県のクロム全含有量、塩酸溶出量、水溶出量およびヒトの健康リスク評価図のイメージを

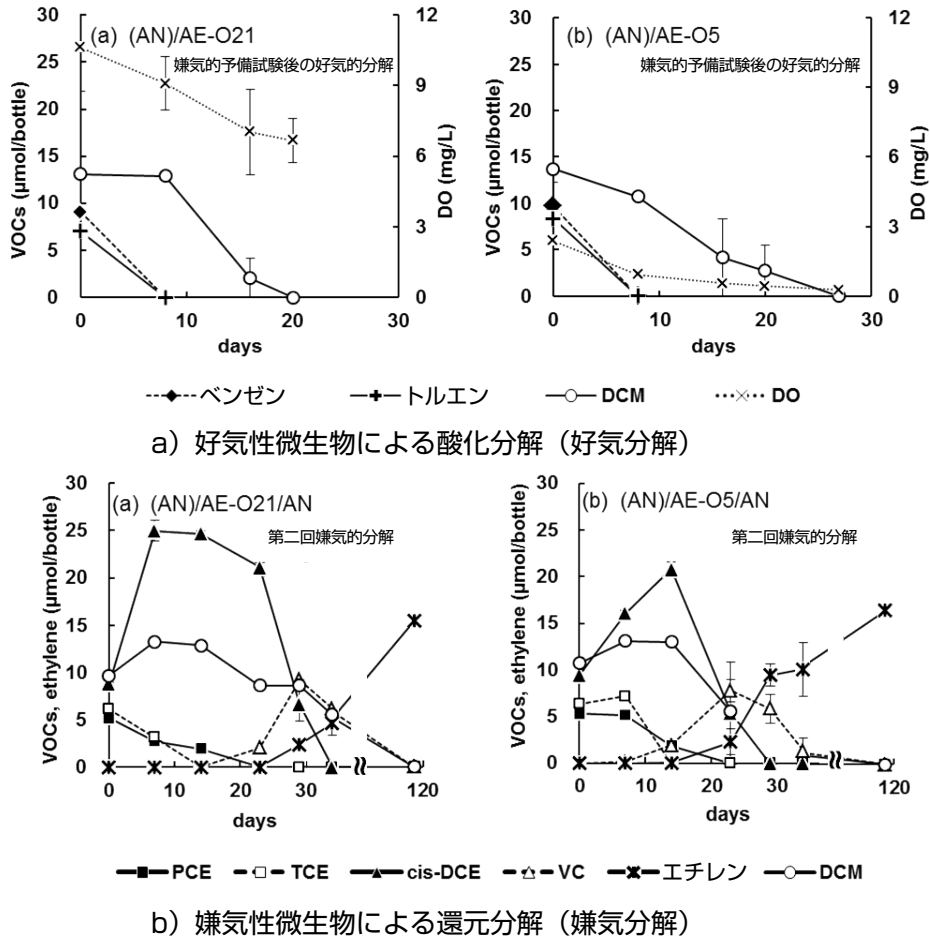


図4 環境微生物によるVOC複合汚染の完全分解例¹⁹⁾

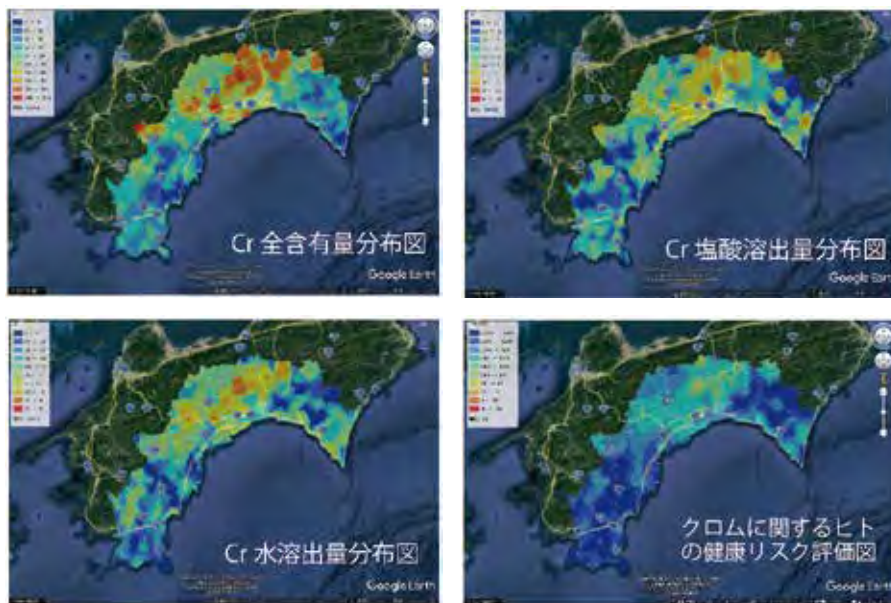


図5 高知県「表層土壌評価基本図」におけるクロムの評価

示す。全含有量が高くても、必ずしも溶出量は高くないこと、溶出量が環境基準を超過した地点でも、地域の産業構造および住民の生活スタイルを考慮したヒトの健康リスクは極めて低いことが明らかである。現在、四国地域の整備と公表に向けた調査と解析を進めており、将来的には全国版への展開を目指している。

4.4 サステナブル・レメディエーション支援ツールの開発

サステナブル・レメディエーションは浄化技術そのものではなく、土壌および地下水汚染対策において、環境面だけでなく社会および経済的側面も統合的に考慮し、最適な対策措置を選定する意思決定のプロセスである^[8]。サステナブル・レメディエーションは一律の環境基準に基づく浄化対策技術ではなく、米国環境保護庁 (US EPA) および米国試験材料協会 (ASTM)^[21] が提唱したグリーン・レメディエーションを発展させたものである。近年では、国際標準化機構 (ISO) よりサステナブル・レメディエーションに関する枠組みの基準も発行され^[10]、著者はエキスパートの1人として制定過程におけるレビュアーとして基準化に携わっていた。現時点では、サステナブル・レメディエーションに関する枠組みが提示されたものの、社会実装に向けたツールはまだ確立されていない。そこで、著者は所内外の研究者らと連携し、階層化意思決定手法に基づくツールの開発を進めることにした (図6)^[22]。

この手法は、問題の分析において、主観的判断とシステムアプローチを上手く融合した問題解決型意思決定手法の一つであり、ハイアラーキカル・デシジョン・プロセスとも称される^[23]。この手法を用いることにより、ステークホルダーにおける意思決定の過程において、異なる立場にいる利害関係者らの主観的な意見を相対的な点数で入力・集約し、

システムによる客観的・中立的な結果を出すことが可能となるため、合意形成が実現しやすく、意思決定も円滑に行われる。このツールの一般公開に向けた開発を進めている。

5 今後の課題と展望

土壌汚染問題は発展途上国においてその深刻さが増大しているものの、日本を含む先進国において、依然として直面しなければならない社会問題のひとつである。しかし、汚染物質の多様性に加え、土壌の多様性や地盤の不均質性および異方性等により土壌汚染問題は非常に複雑である。このため、土壌汚染問題を効率的・効果的に解決するためには、単一分野の知識や要素技術の開発だけでは不十分である。多分野融合による実用化可能な技術開発のほか、柔軟に統合・構成する必要もある。また、より効果的な規制・管理のあり方の検討も必要不可欠であると考えられる。

土壌汚染対策には莫大な費用を要するケースが多いため、環境面ではなく、経済的および社会的側面も考慮した対策・管理システムの構築が極めて重要である。また、リスク評価に基づく対策技術の適用や土地の用途等も考慮した対策技術の選定等、持続的な開発と発展が可能となるような土壌汚染対策と管理システムの確立も重要であると考えられる。このようなシステムの構築において各種要素技術の統合を図ることも可能である。

誌面と時間等の制限や著者の浅学非才等により記述の不十分な部分や、場合によっては誤解もあるかもしれないが、今後さらなる議論を深め、日本における土壌汚染問題だけでなく、環境問題に係る国際協力や連携に少しでも多めに貢献できれば幸いである。

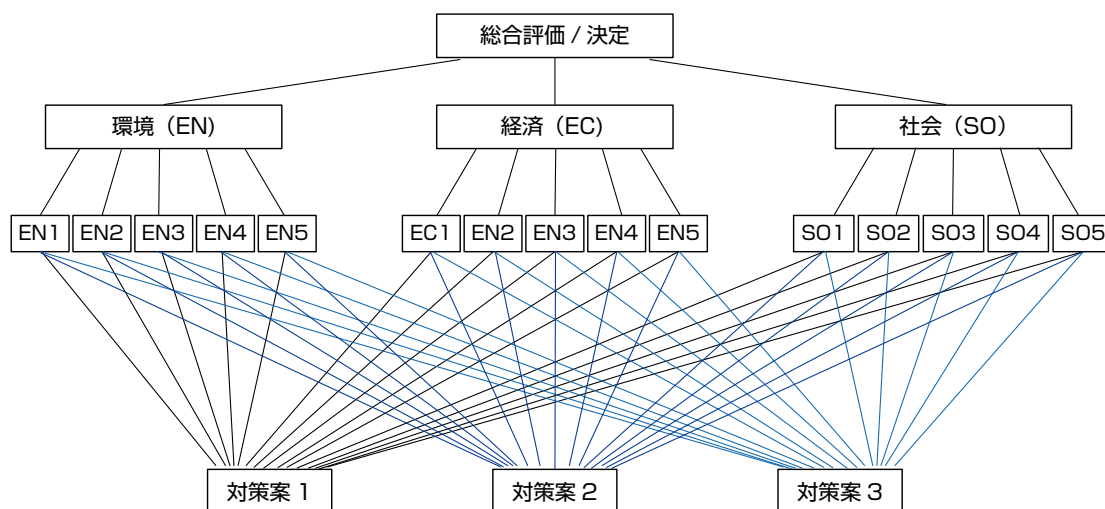


図6 サステナブル・レメディエーションに係る意思決定プロセスの階層例^[22]

用語の説明

用語1：重金属類：重金属とは比重の比較的大きい金属を指しており、一般的に比重が4～5以上のものである。法律および土壌汚染分野では、重金属のほか、鉛や水銀等の重金属と同じく人への健康被害をもたらすシアン化合物やふっ素およびその化合物、ほう素およびその化合物を含む。

用語2：指定調査機関：手続き根拠法に基づいて特定の調査等を行うに当たって、適切な調査等を行うことができる機関として法に基づき指定される。土壌汚染対策法（2002）第3条又は第4条に基づく調査を行う場合には、環境大臣の指定する者に調査をさせなければならない。この場合の環境大臣の指定する者を指定調査機関という。

参考文献

- [1] 環境省水・大気環境局：平成27年度農用地土壌汚染防止法の施行状況（2016）。
- [2] 土壌環境センター：我が国における土壌汚染対策費用の推定（2000）。
- [3] 環境省水・大気環境局：平成28年度土壌汚染対策法の施行状況及び土壌汚染調査・対策事例等に関する調査結果（2018）。
- [4] European Environment Agency (EEA): Main contaminants at industrial and commercial sites affecting soil in Europe as % of total, http://www.eea.europa.eu/data-and-maps/figures/main-contaminants-at-industrial-and-commercial-sites-affecting-soil-in-europe-as-of-total/csi15_fig02.eps/image_large, accessed 2019-01-03.
- [5] 中央環境審議会土壌農薬部会土壌汚染技術基準等専門委員会：油汚染対策ガイドライン—鉛油類を含む土壌に起因する油臭・油膜問題への土地所有者等による対応の考え方—（2006）。
- [6] 張 銘：土壌汚染対策と制度の今後、*環境管理対策と制度の今後講演要旨集*、エコケミストリー研究会、65–74（2017）。
- [7] 駒井武、川辺能成、原淳子、坂本靖、杉田創：土壌・地下水汚染のリスク評価技術と自主管理手法—リスク管理の実践に向けた構成学的研究アプローチ—、*Synthesiology*, 1 (4), 276 (30)–286 (40)（2008）。
- [8] 張 銘：サステナブル・レメディエーション、*地盤工学会誌*, 65 (1), 55–56（2017）。
- [9] US Sustainable Remediation Forum: Integrating sustainable principle, practice, and metrics into remediation projects, *Remediation*, 19 (3), 5–114（2009）。
- [10] International Standard Organization: Soil quality—Sustainable remediation, ISO 18504（2017）。
- [11] 張 銘：土壌汚染対策法（分析—有機）, *ぶんせき*, 519, 100–101（2018）。
- [12] 岡崎正規：土壌分析法総論, *ぶんせき*, 517 (1), 19–20（2018）。
- [13] 加藤雅彦：土壌汚染対策法（分析—重金属等）, *ぶんせき*, 518, 58–59（2018）。
- [14] 星野美保子、張 銘、鈴木正哉、月村勝宏、大田昌昭、秋田憲：自然由来汚染土壌における鉛の存在形態の解析、*第19回地下水・土壌汚染とその防止対策に関する研究集会講演集*（2013）。
- [15] 杉田創、小熊輝美、張 銘、原淳子、高橋伸也：Mg系及びCa系使用済ヒ素吸着材に関する環境安定性評価—土壌の影響—、*土木学会論文集G(環境)*, 72 (7), III_437–III_448

- (2016)。
- [16] 杉田創、小熊輝美、張 銘、原淳子、川辺能成：Mg系使用済ヒ素吸着材の環境安定性に及ぼすケイ酸の影響、*土木学会論文集G(環境)*, 73 (7), III_407–III_418（2017）。
- [17] 杉田創、小熊輝美、張 銘、原淳子、川辺能成：使用済Ca系ヒ素吸着材の環境安定性に及ぼすケイ酸の影響、*土木学会論文集G(環境)*, 74 (7), III_493–III_502（2018）。
- [18] M. Yoshikawa, M. Zhang and K. Toyota: Enhancement and biological characteristics related to aerobic biodegradation of toluene with co-existence of benzene, *Water Air Soil Pollut.*, 227 (9), 340（2016）。
- [19] M. Yoshikawa, M. Zhang and K. Toyota: Integrated anaerobic-aerobic biodegradation of multiple contaminants including chlorinated ethylenes, benzene, toluene, and dichloromethane, *Water Air Soil Pollut.*, 228 (1), 25（2017）。
- [20] M. Yoshikawa, M. Zhang, F. Kurisu and K. Toyota: Bacterial degraders of coexisting dichloromethane, benzene, and toluene, identified by stable-isotope probing, *Water Air Soil Pollut.*, 228 (11), 418（2017）。
- [21] ASTM: Standard Guide for Greener Cleanups, E2893-13, 1-30（2013）。
- [22] 張 銘、保高徹生、古川靖英、中島 誠：ハイアラーキカル・デシジョン・モデリング法に基づくサステナブル・レメディエーション意思決定ツールの検討、*第23回地下水・土壌汚染とその防止対策に関する研究集会講演集*, 811–814（2017）。
- [23] V. Rajput and A. C. Shukla: Decision-making using the analytic hierarchy process (AHP), *International Journal of Scientific Research*, 3 (6), 135–136（2014）。

執筆者略歴

張 銘（ちょう めい）

1996年3月九州大学大学院（工学）博士取得。1996年10月科学技術振興事業団科学技術特別研究員。1999年7月主任研究官として工業技術院地質調査所に入所。2001年4月産総研深部地質環境センター主任研究員。2011年4月同所地圏資源環境研究部門地圏環境リスク研究グループ長。2016年4月より東北大学大学院環境科学研究科連携講座教授を兼任。放射性廃棄物の地層処分や土壌・地下水汚染浄化技術等に係る研究開発に従事している。



査読者との議論

議論1 全体について

コメント（牧野 雅彦：産業技術総合研究所）

土壌・地下水汚染問題は人の健康や社会に深刻で大きな影響を与えるためその解決に向けた研究は重要である。著者はこの論説で研究目標、それと社会とのつながり、シナリオ、要素技術、要素技術間の統合について分かりやすく丁寧に記述している。また、対策の支援ツールとして「サステナブル・レメデーションに係る意思決定プロセス」の開発に取り組み、将来への展望が期待できる。以上、この論説はシンセシオロジーの査読基準を十分に満たしており掲載を推薦する。

コメント（内藤 茂樹：産業技術総合研究所）

この論説は、長期の技術・研究開発が必要になる土壌・地下水汚染問題の解決に向けたシナリオを述べています。SDGs「持続可能な開発目標」の17の目標の複数に貢献する、その挑戦的な課題は広範囲な研究対象・要素技術開発と環境・経済および社会的側面を統合化し、汚染対策措置の意思決定が重要であることを述べており、

シンセシオロジーにふさわしい論説と考えます。

議論2 はじめについて

質問・コメント(内藤 茂樹)

「わが国では、18世紀後半の産業革命以降」というところが、鉱山開発は戦国時代から行われていたが、重工業の発達ということであれば、明治になってからであり、19世紀後半～20世紀初頭の官営八幡製鉄設立以降とするべきではないでしょうか。

回答(張 銘)

ご指摘頂いた通り、日本における鉱山開発の歴史はさらに古く、また、重工業の発達は19世紀後半からとなります。「足尾鉍毒事件」は日本最初の公害であり、わが国の公害の原点とも称されております。誤解を避けるために、文章を「19世紀後半からの重工業の発達に伴って」と修正させて頂きました。鉱山開発自身はそれ以前からも行われておりますが、盛んにではないと考えております。また、「足尾鉍毒事件」は「わが国の公害の原点」であることも追記いたしました。

議論3 土壌・地下水汚染に係る構成学的意義について

質問・コメント(内藤 茂樹)

「リスク評価に基づくリスクコミュニケーション等の技術」とはどのような技術なのでしょうか？

回答(張 銘)

リスク評価は不確実性があるものの、基本的に汚染物質の有害性と曝露量により、科学的に計算・評価できるものであり、リスクコミュニケーションは社会心理学的なアプローチとなります。リスクコミュニケーションにおいて、如何に科学的・客観的な知見を分かりやすく相手に伝え、リスクに対する理解あるいは受容、さらには合意形成までに持っていきけるかに係るコミュニケーション技術をこの論説では「リスク評価に基づくリスクコミュニケーション等の技術」と表現させて頂きました。

議論4 調査・評価に関する技術開発について

質問・コメント(内藤 茂樹)

「沈降分級とX線回折分析を用いた鉛含有鉍物の存在状態の解明と定量分析」について簡単に分析方法を記載された方が良いものと思われまます。「某サイトで採取された資料の評価で、一つの資料は粒子の大きさと正の相関、方鉛鉍の含有量と良い相関があり、もう一つの資料では鉛濃度が逆に粒子の大きさと負の相関があり、明礬石の含有量と正の相関が認められた。」と記載があるため、定量分析法として意味ある分析法かと読者は疑われるものと思います。結果だけではなく、結論の部分等もう少し言葉を足さないどのように理解すれば良いのか解らないものと思います。

回答(張 銘)

ご指摘を踏まえ、分析法の概要を追記いたしました。また、結果の持つ意味についても、追記させて頂きました。

議論5 浄化・対策に関する技術開発について

質問・コメント1(牧野 雅彦)

図4b「嫌気性微生物による還元分解」のグラフで、エチレンが日数の経過につれて増大しているのが気になります。この論説では分解が確認されたと記述されているので、本グラフの分かりやすい説明は可能でしょうか？ また、図中でそれぞれ(a)、(b)と分かれておりその説明もありません。

回答1(張 銘)

嫌気性微生物によるPCEの還元分解は逐次的脱塩素化反応とも称され、 $PCE \Rightarrow TCE \Rightarrow DCE \Rightarrow VC \Rightarrow ETH$ (ethylene) というルートで分解されます。ETHは毒性のあるPCEやTCE、DCEおよびVCと違って、無害であるため、ETHまでできた分解を完全分解と言います。この点をより分かりやすくするために、この論説に微修正を加えさせて頂きました。なお、分解微生物の種類によって、TCEが*cis*-DCEのほか、*trans*-DCEおよび1,1-DCEに分解される可能性もありますが、著者らの実験結果のみならず国内外ほとんどの報告事例でも、*cis*-DCE経路ルートで分解されています。

図中の(a)と(b)につきましては、それぞれ異なった試験条件(酸化分解試験の初期に設定したヘッドスペース酸素濃度)に対応しており、この点についてもこの論説に追記させて頂きました。なお、ヘッドスペースとは、密閉した試験瓶の中で、液体と固体の土壌粒子で充満していない空間を指します。かなり複雑で専門的な試験であるため、この論説では詳細な記載を控させて頂き、ご興味のある読者には、Open Accessの原著論文を参照して頂ければ幸いです。

質問・コメント2(内藤 茂樹)

著者の研究部分で引用[15]-[20]の論文のまとめが記載されているが、実用化を見据えてどのような工夫をしたとか、実際の汚染現場で複合汚染を再現した条件等を説明されてはどうか？ また図4が小さすぎて理解不能。掲載するのであれば、もう少し大きくすべきと考えます。

回答2(張 銘)

ご指摘を踏まえて、不溶化に関しては、考慮した土壌の種類を追記いたしました。また、VOCによる複合汚染については、なぜ、その条件に設定したかについてもその理由を追記いたしました。

図につきましては、文字が読めるように大きく調整いたしました。また、他の査読者から頂いたご意見と合わせて、試験条件等も追記いたしました。