

土壌環境汚染計測モニタリング
機械システムに関する調査研究
- レーザープラズマ分光法による
重金属類の測定 -

報 告 書

- 要 旨 -

平成 17 年 3 月

財団法人 機械システム振興協会
委託先 財団法人 エンジニアリング振興協会



この事業は、競輪の補助金を受けて実施したものです。

序

わが国経済の安定成長への推進にあたり、機械情報産業をめぐる経済的、社会的諸条件は急速な変化を見せており、社会生活における環境、防災、都市、住宅、福祉、教育等、直面する問題の解決を図るためには、技術開発力の強化に加えて、ますます多様化、高度化する社会的ニーズに適応する機械情報システムの研究開発が必要であります。

このような社会情勢に対応し、各方面の要請に応えるため、財団法人 機械システム振興協会では、日本自転車振興会から機械工業振興資金の交付を受けて、経済産業省のご指導のもとに、機械システムの開発等に関する補助事業、新機械システム普及促進補助事業等を実施しております。

特に、システム開発に関する事業を効果的に推進するためには、国内外における先端技術、あるいはシステム統合化技術に関する調査研究を先行して実施する必要がありますので、当協会に総合システム調査開発委員会（委員長 放送大学 副学長 中島尚正 氏）を設置し、同委員会のご指導のもとにシステム技術開発に関する調査研究事業を民間の調査機関等の協力を得て実施しております。

この「土壌環境汚染計測モニタリング機械システムに関する調査研究 - レーザープラズマ分光法による重金属類の測定 - 報告書」は、上記事業の一環として、当協会が財団法人エンジニアリング振興協会 に委託して実施した調査研究の成果であります。

今後、機械情報産業に関する諸施策が展開されていくうえで、本調査研究の成果が一つの礎石として役立てば幸いです。

平成17年3月

財団法人機械システム振興協会

はじめに

近年、土壌汚染が産業界における大きな社会問題となっており、これらの汚染を短期間かつ低コストで調査するニーズが高まっています。これを可能とするため現地で測定可能、かつリアルタイムの計測判定を行う機械システム技術の実現に向けた技術開発が望まれています。土壌汚染を現地で判断できる機械技術はまだ実現されていないのが実情であります。土壌をサンプリング後輸送し、分析にまわしているのが現状であり、その費用が高額であるのみならず、分析に数週間の時間を必要とするため、充分なる調査の実施を阻害しています。その結果プラントを操業する産業において資産リスク、浄化修復リスク、賠償責任リスク、ブランドリスクなど多くのリスクが事業者にとって死活問題となっており、緊急の課題であります。出来る限り早い汚染状況把握が的確な汚染対策の第一歩として求められています。

大都市周辺を中心に、都市再生等の再開発により、工場跡地等の土地利用の転換がなされてきています。これに伴い、重金属、揮発性有機化合物等による土壌汚染が顕在化してきており、最近では、汚染事例の判明件数の増加が著しく高い水準で推移してきています。これらの現象を踏まえ、健康に与える悪影響等、汚染土壌に対する国民の関心が高まる中、平成14年5月29日に、「土壌汚染の状況の把握に関する措置及びその汚染による人の健康被害の防止に関する措置を定めること等により、土壌汚染対策の実施を図り、もって国民の健康を保護する」を目的に「土壌汚染対策法」が公布されました。

本法律では、土壌汚染の影響により、都道府県知事は土地の所有者等に対し「指定調査機関による調査・報告及び汚染の除去等の措置を講ずべきことを命ずることができる」権限等が盛り込まれています。

産業界からこの法律を見ると、企業が所有している土地の価値が影響を受けることとなります。すなわち、土壌汚染の有無を確認するための調査費用が必要となり、土壌が汚染されている場合はさらに土壌浄化費用が必要となるため、これらの費用分が土地の価値から減じられることとなります。直接的な土地の売買だけでなく、国際標準的な減損会計を行う場合は、これらの減額分を反映させなければなりません。したがって、工場等の土地の所有者を中心に、今後土壌汚染の有無についての確認のニーズが非常に高まると予想されています。

一方、現在の土壌汚染の計測は、一般的に時間と費用が多分に必要とされるため、迅速かつ安価な方法での計測が要求されています。

本調査研究は、土壌汚染のオンサイトリアルタイムモニタリング技術の開発に向けて、レーザーを用いた分光分析技術の可能性を明らかにすることを目的として実施し、成果を収めました。本研究の成果が、今後の土壌環境汚染モニタリング技術の一助となることを切望する次第です。

平成17年3月

財団法人 エンジニアリング振興協会

目 次

序

はじめに

1 . 調査研究の目的	1
2 . 調査研究の実施体制	3
3 . 調査研究内容の要約	7
3.1 土壌汚染の現状	8
3.1.1 土壌汚染関連市場の動向	15
3.1.2 企業リスクとマネジメント	22
3.1.3 汚染調査技術の開発動向	28
3.2 測定対象物質の検討および計測システムの条件検討	30
3.3 レーザープラズマ分光法の適用性検討実験	36
3.3.1 レーザープラズマ分光分析法	36
3.3.2 基礎実験の条件検討	45
3.3.3 模擬汚染土壌試料の製作	49
3.3.4 レーザーの波長、エネルギー及び集光度の適正化に関する検討	57
3.3.5 プラズマ分光の補助的手段としての雰囲気ガスの影響	63
3.3.6 土質の影響	67
3.3.7 土壌の水分の影響	72
3.3.8 土壌の締固め度の影響	73

3.3.9 重金属の検出感度と検量線	77
3.4 分析法の評価と課題の抽出	83
4 . まとめ	85
5 . 調査研究の今後の課題と展開	87

1 . 調査研究の目的

近年、都市再生プロジェクトが活発化する中、工場跡地などの統廃合や土地の有効活用のための不動産取引が増加している。土壌汚染は、こうした土地取引の際に顕在化する事例が多く、土地の売り手や買い手、さらには住民にも様々なリスク負担を強いる社会的かつ産業上の問題である。

土壌汚染が判明した事例件数は、環境省に報告されたものだけで平成 12 年度までに 570 件を上回り、その 6 割近くが都市圏に集中しているとされる。しかし、現実の土壌汚染はその数百倍はあると言われ、調査を必要とする土地は全国で約 90 万カ所に上るとの推計もある。必要な汚染調査が行われない理由として、現状の技術で十分な現地調査を行う場合、多大な費用や期間を要するという問題があると考えられる。対策措置までを含む土壌汚染対策全体のコストを低減するためには、現地調査による汚染状況の把握が重要であり、汚染を短期間かつ低コストで調査するニーズが高まっている。

汚染の範囲や程度の迅速な把握を可能とする技術の開発を目指して、各方面で取り組みがなされているが、土壌汚染をオンサイト・リアルタイムに測定する機械システムは未だ実現していない。このために、電気・機械・金属製造業や化学工業といったプラント産業等において資産リスク、賠償責任リスク、ブランドリスクなど多くのリスクが発生している。これらのリスクを適切に管理する上で、できる限り早い段階で汚染の拡がりや程度といった汚染の概況を把握することが求められている。迅速で的確な対策措置の実施のためには、汚染状況の早期把握が重要であり、汚染状況を効率的に調査できる新しい汚染測定機械システムが必要となっている。

このような土壌汚染測定機械システムを実現するための中核技術として、レーザープラズマ分光分析法の適用が考えられる。レーザープラズマ分光分析法には、測定対象物の溶媒への抽出といった前処理を必要とせず固体試料を直接分析することが可能、また多種の元素の同時分析が可能といった、オンサイトにおける環境分析に適した特長がある。

しかしながらレーザープラズマ分光分析法を土壌環境計測に適用した事例は、国内外を通じて極めて少なく、本分析法の適用性や土壌中重金属の検出に関する技術的課題は明らかになっていない。例えば、件数としてはわずかではあるが先行する研究事例においては、検出感度の向上策として土壌試料に非常に大きな荷重をかけて圧縮し、土壌中重金属の検出感度を高めるといった実用上実施困難な方法でやっと検出を可能にしているというのが現状であり、土壌の計測に適したレーザープラズマ分光分析技術は確立されていない。

本調査研究は、上記の課題を解決するために、各種の土壌性状を模擬した汚染土壌試料を製作し、それらにレーザープラズマ分光分析法を適用する基礎実験を行うことで、土壌の各種性状が検出性能に与える影響を把握し、レーザープラズマ分光分析法の土壌環境計測への適用可能性について評価することを目的として行うものである。

本調査研究で実施する体系的な実験等の検討は、国際的にも先駆性が高く、土壌のように複雑で不均質な対象の分析に適したレーザープラズマ分光分析技術の確立に資するものである。

レーザープラズマ分光分析に基づくオンサイト、リアルタイム分析が実現すれば、環境の計測やモニタリングの質と自由度を飛躍的に高めることができるため、環境計測分野における革新的技術となる。

本調査研究により、土壤環境汚染計測モニタリング機械システムの実現に向けて、土壤の分析に適したレーザープラズマ分光分析技術という基礎的な要素技術の確立が可能になると考える。

2 . 調査研究の実施体制

本調査研究は、財団法人機械システム振興協会の中に設けられた「総合システム調査開発委員会」の指導のもと、委託先の財団法人エンジニアリング振興協会において実施された。

また、財団法人エンジニアリング振興協会の中に、産学の有識者により構成された「土壤環境汚染計測モニタリング機械システムに関する調査研究 - レーザープラズマ分光法による重金属類の測定 - 委員会」を設置し、調査研究を実施するための下部組織として作業部会を設けた。作業部会は、調査研究目標の設定、研究計画・実験計画の作成、研究の解析・評価に関する指導を委員会から受けて、調査研究を実施した。

本調査研究の実施体制を図 2-1 に示す。

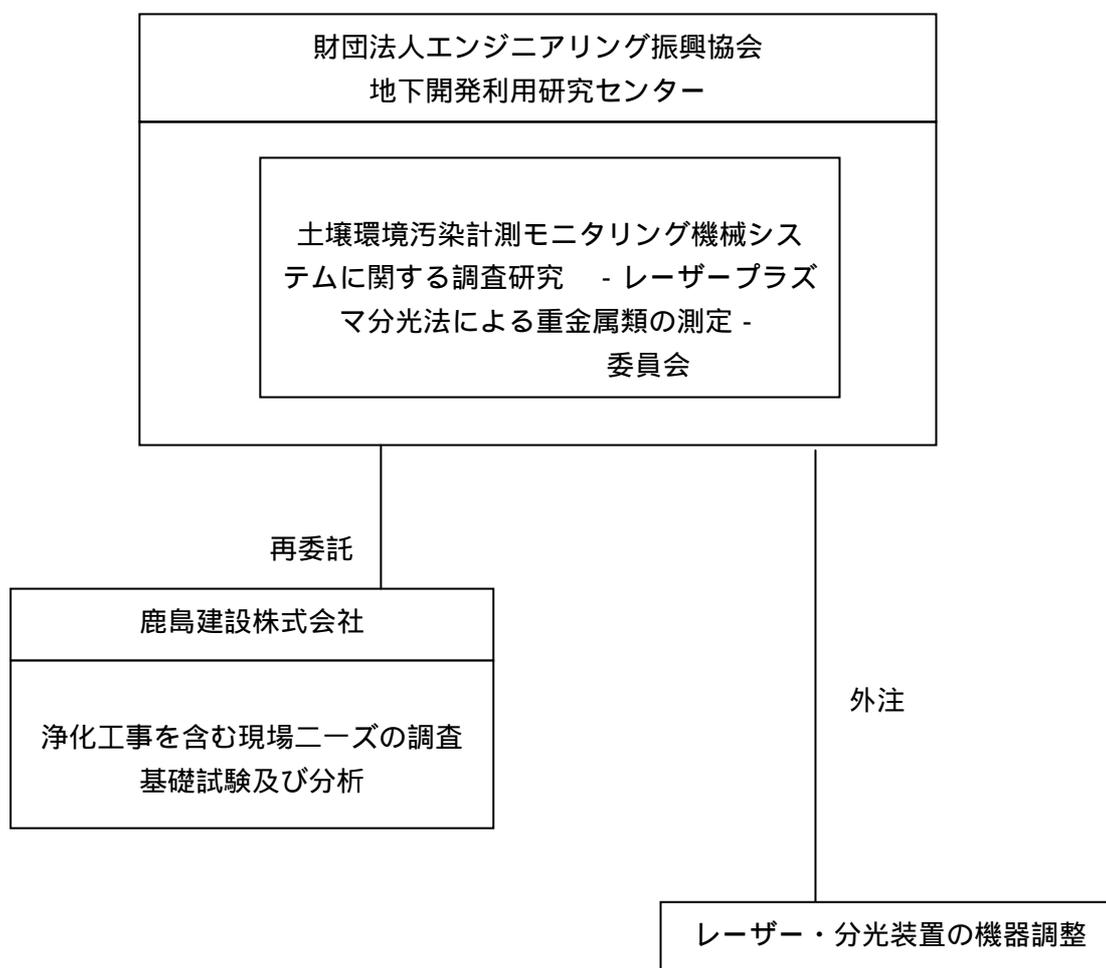


図 2-1 本調査研究の実施体制

総合システム調査開発委員会委員名簿

(順不同・敬称略)

委員長	放送大学 副学長	中 島 尚 正
委 員	政策研究大学院大学 政策研究科 教授	藤 正 巖
委 員	東京工業大学 大学院総合理工学研究科 知能システム科学専攻 教授	廣 田 薫
委 員	東京大学 大学院工学系研究科 助教授	藤 岡 健 彦
委 員	独立行政法人産業技術総合研究所 産学官連携部門 コーディネータ	太 田 公 廣
委 員	独立行政法人産業技術総合研究所 産学官連携部門 シニアリサーチャ	志 村 洋 文

土壤環境汚染計測モニタリング機械システムに関する調査研究

- レーザープラズマ分光法による重金属類の測定 -

委員会名簿

(順不同・敬称略)

委員長	香川 喜一郎	福井大学 教育地域科学部 教授
オブザーバ	大滝 義彦	経済産業省 製造産業局 国際プラント推進室 プラント貿易企画第一係長
オブザーバ	山田 哲也	経済産業省 経済産業政策局 地域経済産業グループ 産業施設課 技官
委員	杉岡 幸次	独立行政法人理化学研究所 レーザー物理部門 主任研究員
委員	佐藤 雄也	社団法人土壤環境センター 専務理事
委員	草野 直幹	株式会社イー・アール・エス 代表取締役社長
委員	藤村 久夫	鹿島建設株式会社 土木管理本部 土木技術部 部長
委員	三浦 悟	鹿島建設株式会社 技術研究所 メカトロニクスグループ グループリーダー
事務局	富田 幸路	財団法人エンジニアリング振興協会 地下開発利用研究センター 技術開発第一部 研究主幹

土壌環境汚染計測モニタリング機械システムに関する調査研究

- レーザープラズマ分光法による重金属類の測定 -

実行組織

(順不同・敬称略)

	宮川 彰彦	財団法人エンジニアリング振興協会 地下開発利用研究センター 研究理事
	富田 幸路	財団法人エンジニアリング振興協会 地下開発利用研究センター 技術開発第一部 研究主幹
	城所 敏郎	財団法人エンジニアリング振興協会 地下開発利用研究センター 技術開発第一部 研究主幹
	小林 俊一	財団法人エンジニアリング振興協会 地下開発利用研究センター 技術開発第一部 研究主幹
	前田 信行	財団法人エンジニアリング振興協会 地下開発利用研究センター 技術開発第一部 研究主幹
協力員	三浦 悟	鹿島建設株式会社 技術研究所 メカトロニクスグループ グループリーダー
協力員	露木 健一郎	鹿島建設株式会社 技術研究所 メカトロニクスグループ 主任研究員

3 . 調査研究の内容

本調査研究では、土壤環境汚染のオンサイト・リアルタイム測定技術の開発に向けて、レーザープラズマ分光分析法の適用可能性を明らかにすることを目的として、以下に示すような調査研究を行った。

(1) 開発動向の調査及び測定対象物質の検討

はじめに土壤汚染問題の全体について把握するために、土壤汚染の現状や市場動向について調査した。また、減損会計法の導入に伴って今後重要性が増すと考えられる土壤汚染リスクの管理について調べた。さらに、具体的な汚染調査技術の動向について、特に現場での迅速な汚染状況把握を目指した調査技術の開発動向を文献に基づいて調査した。

(2) 計測システムの条件検討

前出の土壤汚染の現状等に関する調査結果に基づき、測定ニーズの高い汚染の種類、汚染を調査する深度、汚染の検出性能（検出すべき含有量）など、開発を目指す機械システムが具備すべき性能や仕様の主要部分について検討を行った。

(3) 分析手法の検討と基礎実験の実施

これまで明らかになっていないレーザープラズマ分光分析法の土壤汚染計測への適用可能性を評価するために、模擬汚染土壤試料を用いた実験を計画した。

実験に先立ち、汚染物質の検出に影響を及ぼすと考えられる因子を検討し、実験パラメータを設定した。実験パラメータの設定に際しては、従来のレーザープラズマ分光分析が多く対象としてきた金属やガスのような比較的均質な材料の分析事例でなく、不均質材料であるコンクリートの分析事例を参考にした。

適用性の検討実験で用いる模擬汚染土壤試料を、実験の再現性等に配慮して製作した。

製作した模擬汚染土壤試料を用いて、レーザープラズマ分光分析法による汚染物質の検出実験を実施した。

(4) 実験結果の整理、課題の抽出

模擬汚染土壤試料を用いた実験の結果を整理し、検出性能のたまかな評価を行うとともに、実用化に向けた課題を抽出した。

3.1 土壌汚染の現状

土壌汚染の問題が報道などで頻繁に取り上げられるようになったのは、比較的最近のことであるが、実際には高度経済成長期の頃から、わが国の経済発展に伴って、土壌汚染は徐々に蓄積されてきたものであると考えられる。しかし、一般に影響が局所的であることや、外観だけでは発見が難しいことなどから、深刻な健康被害をもたらしたために明らかになった一部の事例を除き、汚染が判明することは少なかったと言える。

土壌汚染調査事例と超過事例の推移を図 3.1-1 に示す。

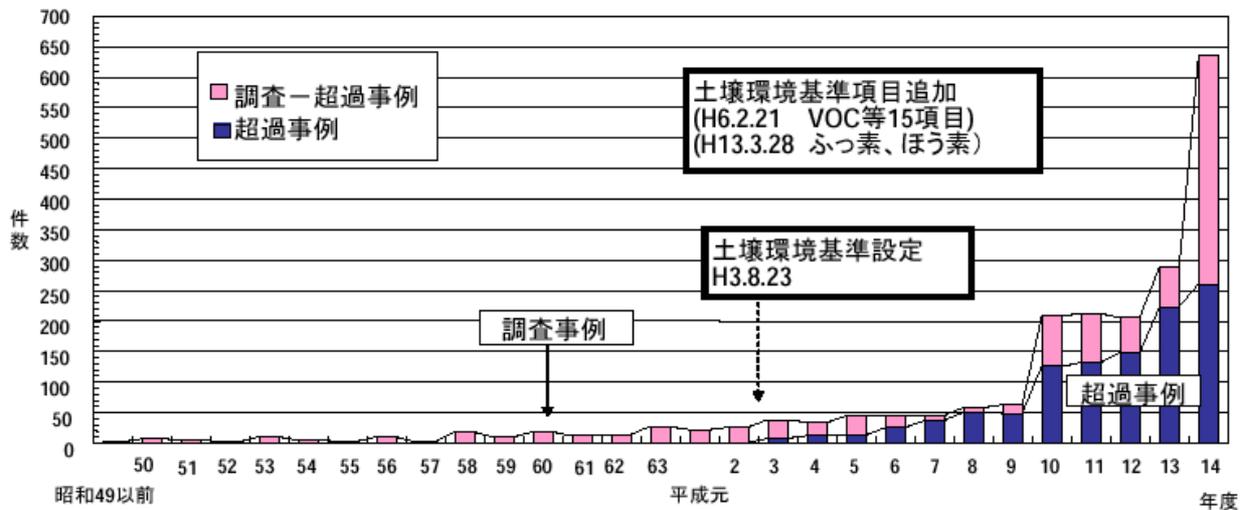


図 3.1-1 土壌汚染の調査事例と超過事例の推移
 (環境省、平成 14 年度土壌汚染調査・対策事例及び対応状況に
 関する調査結果の概要、平成 17 年 1 月 より)

昭和 55 年から、当時の環境庁が土壌汚染の実態調査を進めた結果、各地の汚染が徐々に明らかとなり、昭和 60 年頃からは、熊本市、高槻市、君津市、秦野市などの一部の地方自治体で、土壌汚染に対する取り組みが始められている。その後、平成 3 年に環境基本法の中で、土壌環境基準の設定(平成 6 年に項目追加)が行われた前後から、調査事例の増加傾向が見られ、平成 11 年に環境庁より「土壌・地下水汚染に係る調査対策指針運用基準」が公表された頃には、調査件数が大幅に増加していることが分かる。また同じ頃、調査事例数の増加とともに、土壌環境基準の超過事例数も大幅に増加しており、最近までその増加傾向が続いている。

これらの汚染が判明した事例の現在と過去の土地利用状況について、表 3.1-1 に示す。

表 3.1-1 汚染事例における現在と過去の土地利用状況（累積）
 （環境省、平成 14 年度土壌汚染調査・対策事例及び対応状況に
 関する調査結果の概要、平成 17 年 1 月 より）

現在 当時	工場・事業場敷地	工場・事業場跡地	住宅地	廃棄物処分場跡地	公園・運動場	道路	河川敷	農用地	山林	その他	不明	延べ回答数
	工場・事業場敷地(注)	534	102	62	2	3	7	1	2	1	8	
工場・事業場跡地	53	149	53	2	7	11	1	0	0	24	10	310
住宅地	8	4	31	0	1	3	0	1	0	3	0	51
廃棄物処分場跡地	2	1	0	6	0	0	0	1	0	0	0	10
公園・運動場	1	1	1	0	11	2	0	0	0	2	0	18
道路	5	1	1	0	2	10	0	0	0	1	0	20
河川敷	0	1	0	0	0	0	2	0	0	0	0	3
農用地	2	0	2	1	0	1	0	5	0	1	0	12
山林	1	0	0	0	0	0	0	0	4	2	1	8
その他	4	2	1	0	1	4	0	1	1	40	1	55
不明	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	2	4
延べ回答数	611	261	152	11	25	38	4	10	6	81	28	1,227

(注)「工場・事業所敷地」にはサービス業も含む。
 超過事例(累積)

表 3.1-1 より、汚染が判明した事例全体の圧倒的多数は、工場・事業所の敷地もしくは跡地であることが分かる。また、過去に工場・事業所の敷地もしくは跡地であって、現在は住宅地になっている場所の汚染判明事例数もかなりの数に上っており、現在住宅地で汚染が判明した事例のうちの 75%は、過去に工場・事業所の敷地もしくは跡地として利用されていた場所となっている。

さらに、現在の土地利用状況が、工場・事業所の跡地となっており、土地が遊休化していると推定される事例が 250 件以上もある。それらの半数以上は、過去も工場・事業所の跡地であった場所であり、長期にわたって土地が遊休化していることがうかがえる。

現在は、土壌汚染対策法により、有害物質使用施設が関係する土地取引に際して、土壌汚染の調査が義務づけられていることから、今後も工場・事業所に関係する超過事例が多数を占めるという同様の傾向は続くものと見られる。

地域別に見た汚染調査事例と超過事例について、図 3.1-2 に示す。本図には、全国の 6 地域ブロック及び超過事例の多い 3 都府県についてのデータを掲載した。

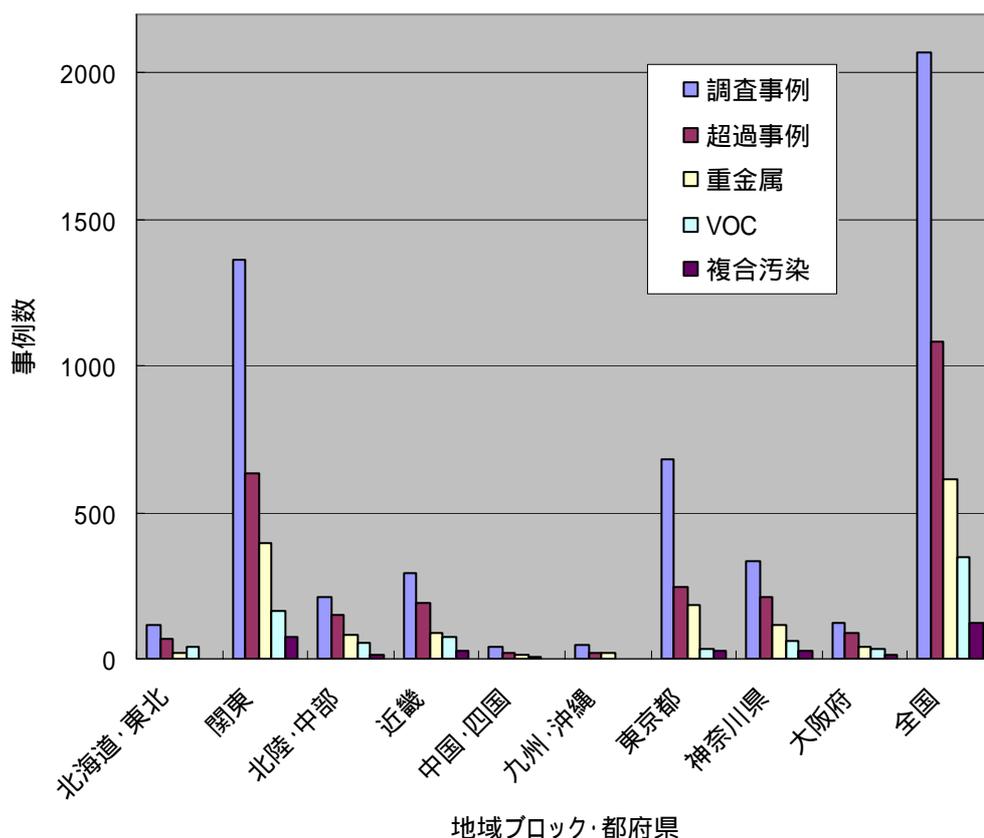


図 3.1-2 地方別の汚染調査事例と超過事例
 (環境省、平成 14 年度土壌汚染調査・対策事例及び対応状況に
 関する調査結果の概要、平成 17 年 1 月 より)

図 3.1-2 より、東京都や近畿、中部といった大都市圏、特に関東地方での超過事例が多く、事例数の多い地域ブロック順では、関東、近畿、北陸・中部、北海道・東北などとなっている。

また、超過事例のうちで、重金属類、VOC (揮発性有機化合物 Volatile Organic Compound) それぞれの超過事例が全体に占める割合は、全国では重金属が 64%、VOC が 36%という状況であるが(複合汚染を除く)東京都については、重金属等の超過事例が東京都の累積超過事例の 87%(複合汚染を除く)と大半を占め、VOC に比べて圧倒的に多くなっている。

都道府県別の超過事例数のデータからは、東京都と神奈川県の超過事例数がそれぞれ 200 件以上であり、3 番目に多い大阪府の 87 件に比べて格段に多くなっている(表 3.1-2 参照)。累積超過事例が 200 件以上という数字は、近畿ブロック全体の累積超過事例数(194 件)より多く、東京都と神奈川県の超過事例数が非常に多いことを示している。

表 3.1-2 都道府県別の調査・超過事例数
 (環境省、平成 14 年度土壌汚染調査・対策事例及び対応状況に
 関する調査結果の概要、平成 17 年 1 月 より)

	都道府県 (政令市を含む)	調査事例 (累積)	超過事例 (累積)	超過事例		
				重金属等	VOC	複合汚染
0 北海道・東北	北海道	27	20	5	15	0
	青森県	9	2	1	1	0
	岩手県	5	3	1	2	0
	宮城県	20	17	12	4	1
	秋田県	3	2	0	2	0
	山形県	36	15	2	13	0
	福島県	14	9	1	6	2
関東	茨城県	6	3	1	1	1
	栃木県	34	23	12	10	1
	群馬県	15	11	4	7	0
	埼玉県	172	77	33	33	11
	千葉県	123	62	38	20	4
	東京都	681	248	187	31	30
	神奈川県	332	209	118	62	29
北陸・中部	新潟県	49	37	20	14	3
	富山県	8	5	4	0	1
	石川県	8	4	3	1	0
	福井県	14	8	1	7	0
	山梨県	3	2	0	1	1
	長野県	9	7	4	3	0
	岐阜県	27	13	6	7	0
	静岡県	20	11	2	8	1
	愛知県	74	60	40	12	8
近畿	三重県	10	7	3	4	0
	滋賀県	30	9	2	7	0
	京都府	10	9	2	5	2
	大阪府	121	87	38	32	17
	兵庫県	107	72	41	26	5
	奈良県	13	7	4	1	2
	和歌山県	3	3	1	2	0
中国・四国	鳥取県	0	0	0	0	0
	島根県	1	1	1	0	0
	岡山県	8	3	1	2	0
	広島県	5	5	4	0	1
	山口県	7	6	2	2	2
	徳島県	2	0	0	0	0
	香川県	8	0	0	0	0
	愛媛県	8	4	3	1	0
	高知県	0	0	0	0	0
九州・沖縄	福岡県	21	11	9	1	1
	佐賀県	2	1	1	0	0
	長崎県	0	0	0	0	0
	熊本県	14	0	0	0	0
	大分県	7	7	6	1	0
	宮崎県	1	0	0	0	0
	鹿児島県	3	2	2	0	0
	沖縄県	0	0	0	0	0
合計		2,070	1,082	615	344	123

物質別の調査事例（累計 2,070 件）及び超過事例（累計 1,082 件）については、表 3.1-3 のとおりである。平成 14 年度に判明した超過事例では、重金属等では砒素、鉛が多く、VOC ではテトラクロロエチレン、トリクロロエチレンに係る事例が多い。累積の事例数では、重金属については鉛、ヒ素、六価クロム、総水銀、VOC についてはテトラクロロエチレン、トリクロロエチレンなどが多い。

表 3.1-3 物質別の調査・超過事例数
 （環境省、平成 14 年度土壤汚染調査・対策事例及び対応状況に
 関する調査結果の概要、平成 17 年 1 月 より）

件数	環境基準項目(溶出基準項目)																									
	重金属等												VOC													
	カドミウム	全シアン	有機燐	鉛	六価クロム	砒素	総水銀	アルキル水銀	PCB	チウラム	シマジン	チオベンカルブ	セレン	ふっ素	ほう素	ジクロロメタン	四塩化炭素	1,2-ジクロロエタン	1,1-ジクロロエチレン	シス-1,2-ジクロロエチレン	1,1,1-トリクロロエタン	1,1,2-トリクロロエタン	トリクロロエチレン	テトラクロロレチレン	1,3-ジクロロプロペン	ベンゼン
調査事例(累積)	467	148	6	777	327	669	552	3	55	2	7	6	116	215	125	89	50	52	139	305	248	43	578	468	10	144
平成14年度判明	109	32	3	202	75	197	152	1	6	1	4	3	37	139	80	20	10	10	24	52	29	6	72	63	2	42
超過事例(累積)	48	112	2	331	182	336	137	1	21	0	0	1	43	87	15	25	23	22	37	170	20	14	266	237	4	75
平成14年度判明	11	30	2	83	48	104	37	1	6	0	0	0	11	62	7	4	4	2	6	31	4	1	38	40	0	18

汚染が発見された事例の汚染面積については、図 3.1-3 のとおりになっており、汚染の規模を把握できた事例（総数 571 件）のうち、100m²以上の汚染面積の事例（460 件）が占める割合は、約 81%となっている。こうした実態から、100m²に 1 地点の密度で調査を実施しても、土壤汚染全体の 8 割程度を把握できるという考え方がとられている。

また、重金属の汚染面積は、VOC に比べて広範囲にわたる事例が多いことが分かる。汚染面積が 1000m²以上の事例が全汚染面積の事例に占める割合を比較すると、重金属については 47%、VOC については 26%となっている。

なお、汚染面積が不明の事例が、重金属の場合で全事例数の 37%、VOC の場合で全事例数の 46%を占めており、現状の調査方法には、汚染の全体的な把握を阻害する要因があることを示していると言える。

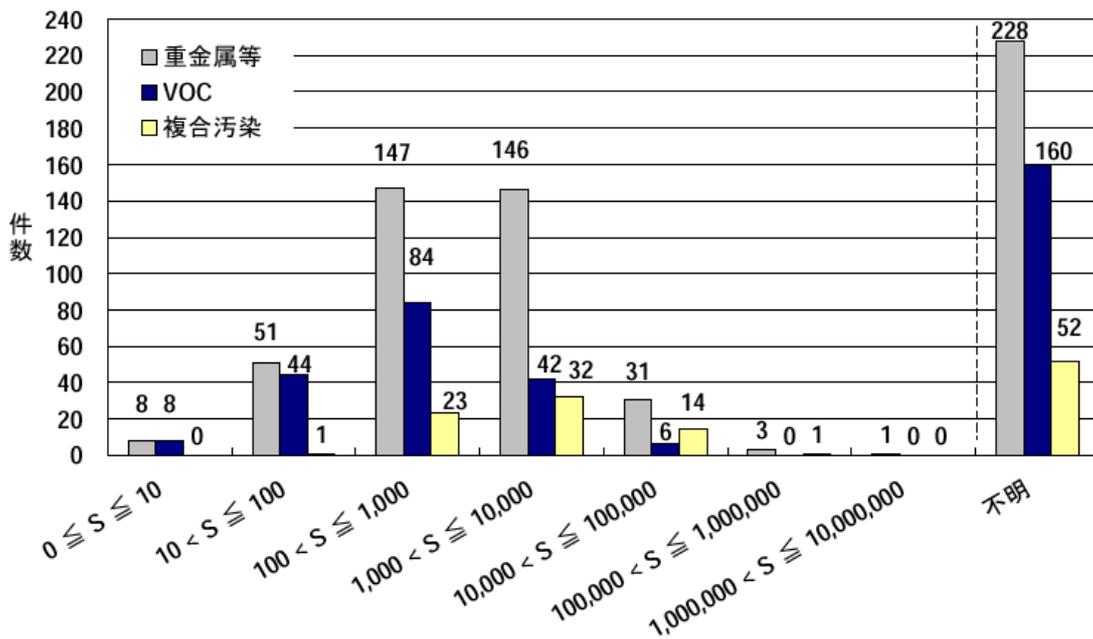


図 3.1-3 汚染面積ごとの超過事例数
 (環境省、平成 14 年度土壤汚染調査・対策事例及び対応状況に
 関する調査結果の概要、平成 17 年 1 月 より)

また、汚染の原因行為(推定)については、表 3.1-4 のとおりである。

重金属、VOC とともに、汚染原因物質の不適切な取扱いによる漏洩が最大の原因行為とされているが、原因不明とされた事例数も多く、特に重金属の場合では、延べ回答数の約 4 割が原因不明とされている。

表 3.1-4 汚染の原因行為
 (環境省、平成 14 年度土壤汚染調査・対策事例及び対応状況に
 関する調査結果の概要、平成 17 年 1 月 より)

(複数回答有)

	超過事例 (累積)	超過事例		
		重金属等	VOC	複合汚染
施設の破損等による汚染原因物質の漏洩事故	95	39	47	9
汚染原因物質の不適切な取扱いによる漏洩	373	134	197	42
汚染原因物質を含む排水の地下浸透	57	27	28	2
廃棄物の埋立処分	50	37	8	5
廃棄物の不法投棄	26	13	9	4
残土の埋立処分	14	14	0	0
その他	67	51	6	10
不明	329	205	76	48
延べ回答数	1,011	520	371	120
無回答	176	133	24	19
合計	1,082	615	344	123

また、調査・対策に要した費用については、環境省による調査結果によれば、恒久対策を完了した調査事例（累積）838 件のうち、151 件(18.0 %)の報告があり、調査費、対策費、モニタリング費全ての総和で、10 億円以上もの費用を要した事例も報告されている。

これらの汚染判明事例については、土壤汚染対策法や各地方自治体の条例に基づく対策措置が進められているところであるが、土壤汚染対策法案の国会における採決に際して行われた付帯決議にも、以下の課題が挙げられている。

「土壤汚染状況調査及び汚染の除去等の措置については、これが適正かつ円滑に実施されるよう、その手法が簡易で低コストなものとするための技術開発の促進を図ること。」

さらに、環境省がまとめた「平成 14 年度土壤汚染調査・対策事例及び対応状況に関する調査結果の概要（平成 17 年 1 月）」には、土壤汚染対策に関する国への要望という自治体へのアンケート結果が掲載されており、それによれば、前年度に比べて要望数が大きな伸びを示したのは、「自治体への土壤汚染調査・対策技術に関する情報提供の充実」や、「調査・対策技術の開発普及」という要望であった。この結果からも、効率的で経済的な調査技術が求められていることがうかがえる。

現状の汚染調査手法は、試料採取・化学分析という手順で行われているが、汚染物質を水や酸などの溶媒に抽出するといった前処理に人手や時間を多く必要とするものであるため、広範囲から多点でサンプリングし、汚染状況を面的に把握しようとする、試料の数が増大して、調査コストが膨大となり、調査期間も長くなるという課題がある。

このような背景から、調査コストを抑えようとして、試料採取地点を不適切に設定した場合や、採取地点数を無理に削減した場合など、汚染を見逃す事例が後を絶たない。その結果、再開発事業着手後に土地の汚染が判明するなど、問題が深刻化、社会問題化して、土地の利用転換が円滑に進まず、土地の遊休化を招く場合がある。土地が遊休化し放置されることは、競争力強化、新規事業機会の獲得に向けた製造業の取り組みに対する大きな阻害要因である。

オンサイト土壌分析が実現すれば、現場で測定をしながら、即座に得られた分析結果に基づいて、適切な調査点数の増減が可能となり、調査コスト・時間の適正化や汚染の見落としの低減が期待できる。

適切な対策措置を早く選定する上で、汚染の早期発見、汚染の範囲や程度の迅速で簡便な評価は重要であり、オンサイト土壌分析の価値は大きいと言える。また、発見が遅れた場合に受ける損害の大きさを考慮すれば、地歴調査だけで実地の調査を行わないことはリスクの大きい選択である。十分な調査を行うことによって、結果として対策措置を含む費用の全体を低減できる可能性もある。そのような意味で、調査の重要性に現在より多くの関心が向けられるべきである。

3.1.1 土壌汚染関連市場の動向

本年2月に、土壌汚染対策法（以下、土対法という）の施行2周年を迎えた。土対法施行が土壌汚染対策の進展にとってどの程度効果を発揮したのか、土壌汚染対策に携わるものにとって大変関心のあるところである。そうした背景のもと、社団法人土壌環境センターでは、平成16年度に初めて同センター会員のかかわった土壌汚染浄化事業の統計調査が実施されている。

本調査研究では、土壌汚染浄化関連市場の動向や将来規模等について、社団法人土壌環境センターの協力を得て、前記統計資料に基づく考察を行った。本節では、土対法の施行状況、及び同統計調査の結果について、概要を紹介する。また、土壌汚染浄化事業の中長期的な将来展望についても述べる。

1) 土対法の施行状況

土対法では、人の健康の保護の観点から次の2つの契機に調査することになっている。

有害物質使用特定施設の使用廃止時に土地所有者等が行う土壌汚染状況調査（以下、3条調査）である。ただし、土地が引き続き工場・事業場の用途に供されている場合など、健康被害の恐れがない場合は、都道府県知事の確認を受けて、工場・事業場以外の用途に転用するときまで調査を猶予できる（以下、3条但し書き）。

土壌汚染による健康被害が生ずるおそれがあると都道府県知事が判断した土地に対する調査命令（以下、4条調査）である。

・ 3条調査の先送り現象

有害物質使用特定施設を設置している工場・事業場は、全国で2万7千程度あると推定されている。そのうち、有害物質使用特定施設の使用の廃止により3条調査の対象となる件数については、景気の動向等により変動するが法案審議時、実績などをもとに年間数百件程度ではないかと思われていた。

土対法施行後1年半の平成16年8月15日現在における、環境省がとりまとめた施行状況（表3.1.1-1参照）によると、使用が廃止された有害物質使用特定施設数は840件である。そのうち3条但し書きで、3条調査の猶予されたものが583件、猶予の確認手続中のものが79件である。

すなわち、土地所有者が3条調査を先送りする、あるいは先送りしようとする事例が全体840件中662件と約8割を占めている。その理由として、例えば3条調査では、廃止する特定施設を含む工場・事業場敷地全体が調査対象となるので、敷地内に稼働中の施設が他にある場合は、工場全体の廃止まで調査を先送りする。工場・事業場敷地内で古くなった有害物質使用特定施設を新しいものに建て替える場合などが考えられる。

3条但し書きで先送りされた案件は、汚染の拡がらないうちに土壌汚染の早期発見、早期対策を実施することで対策コストの縮減をもたらす折角の機会をみすみす失うことにもなりかねない。先送りの理由に注目していく必要がある。

表 3.1.1-1 土壤汚染対策法の施行状況（平成 16 年 8 月 15 日現在）

法第 3 条関係	
有害物質使用特定施設の使用が廃止された件数	8 4 0 件
土壤汚染状況調査の結果報告件数	1 2 2 件
土壤汚染状況調査を実施中の件数	4 4 件
都道府県知事の確認により調査猶予がされた件数	5 8 3 件
上記確認の手続中の件数	7 9 件
その他 （調査を実施するか、確認の手続を行うか行政において検討中のもの等を含む。）	4 4 件
法第 4 条関係	
調査命令を発出した件数	4 件
法第 5 条関係	
基準に適合しない汚染が認められ指定区域として指定した件数 （法第 3 条：29 件 法第 4 条：2 件）	3 1 件
処分方法告示関係	
汚染土壤浄化施設認定件数	4 件

・ 4条調査

4条調査の命令は、都道府県知事に判断が委ねられており、抜かすの宝刀とも思われていたが、すでに4件の命令が出されて、決してそうともかぎらないことを証明したかたちになった。工場・事業場周辺での地下水の飲用利用等されている場合は、周辺で基準を超える地下水汚染が発見されたら、4条調査命令が出される場合があることを示している。

・ 指定区域

土対法5条に基づき、3条調査の結果、基準に適合しない汚染が認められ指定区域として指定された件数は29件である。4条調査の結果、指定区域に指定されたものが2件である。

指定区域に関する情報は、地元都道府県の環境担当部局に行けば誰でも閲覧が可能である。情報開示の進展に伴い、指定区域が今何件あるのか分からないほど、ニュースにならなくなっていることは、注目に値しよう。土対法の施行により指定区域に指定されれば必ず法的に対策済みの土地になるという変化を反映しているものと思われる。指定区域はキズものという呪縛から解放されることが、土壤汚染対策の推進にとって不可欠である。

・ 汚染土壌処分施設の認可数

指定区域から搬出する汚染土壌については、土壤汚染が拡散しないように搬出先を最終処分場又は埋立場所等、汚染土壌浄化施設、セメント等の原材料としての利用の3種類に限定している。このうち と については、その所在地を管轄する都道府県知事が認めた施設でなければならない。 の認可施設数はまだ4件にとどまる。 については、まだ認可施設はない。指定区域の数が今後増加していくことを考えると、 と についての速やかな施設認可が望まれる。

2) 法施行前・後における土壤汚染浄化事業の動向

社団法人土壤環境センターが、平成16年度に実施した第1回の土壤汚染浄化事業統計調査では、土対法施行前年の平成14年度(同法施行後の平成15年2月15日~3月31日のデータを含む。)及び同法の施行初年度にあたる平成15年度における2年度について、同センター会員の実績についてとりまとめられている(表3.1.1-2参照、詳細は同センターHP:<http://www.gepc.or.jp>参照)。

・ 浄化事業の伸び

法施行前(平成14年度)と法施行後(平成15年度)とでは、受注件数及び受注高とも伸びている(表3.1.1-2参照)。環境省調べによると、その間の土対法に基づく調査が170件、そのうち汚染が見つかり指定区域となったものは31件であるので、受注件数の伸びの大部分は土対法以外の取組の増加によるものと見られる。この中には東京都、埼玉県等の自治体の条例に基づく土地改変時における調査・対策も含まれる。

表 3.1.1-2 土壌浄化事業統計（平成 16 年度、社団法人土壌環境センター調べ）
土対法施行前（平成 14 年度）と施行後（平成 15 年度）での受注件数の比較

	平成 14 年度	平成 15 年度
受注実績のある企業数	97 社	109 社
受注件数	3,424 件	5,178 件
受注高	553 億円	729 億円

・ 指定区域に対する市場の評価

土対法では、人の健康の保護を確保できる措置であれば、土地の利用状況に応じて、土壌汚染の除去以外の措置も選択できる。ただし、土壌汚染の除去以外の措置を選択した場合は、当該土地は人の健康リスクについて管理の必要な土地（指定区域）として登録され、公示される。土壌汚染の除去を行った場合にのみ、指定区域の登録が解除される。

土壌汚染対策に対する市場の要求は、土対法対応以外でも掘削除去等の指定区域の指定が解除されるような措置を求めていることがわかる（表 3.1.1-3 参照）。

表 3.1.1-3 措置の選択

		直接摂取リスクに対する措置(件)		地下水摂取リスクに対する措置(件)	
		A	B	A	B
法 3 条対応の対策	平成 14 年度	2	0	2	0
	平成 15 年度	6	0	4	1
法対応以外の対策	平成 14 年度	375	51	431	106
	平成 15 年度	534	66	471	121

A：掘削除去等、「指定区域」の指定が解除される措置。

B：盛り土、封じ込め等、対策を講じても「指定区域」は解除されず、引き続きリスク管理を必要とする措置。

・ 土地の資産価値保全への動き

自主的調査及び対策の動機は平成 14 年度、15 年度とも土地売買が他の動機を大きく引き離している（表 3.1.1-4、表 3.1.1-5 参照）。

統計結果は、土壌汚染があると土地が思った値段では売れないという考えがかなり浸透してきたことを物語っている。同時に、今後の統計の推移を見極める必要はあるが、減損会計の導入を控え企業等の土地所有者は、社有地の資産価値を保全するという観点から土壌汚染に対し自主的に取り組む姿勢を強めていることが窺われる。

なお、土壤環境センターでは、今後は毎年、当該年度の土壤浄化事業統計を取りまとめることとしている。

表 3.1.1-4 自主調査の動機（複数回答有り）

	回答数	土地売買	土地改変	土地資産価値	その他
平成 14 年度	2,298	1,194	266	236	602
平成 15 年度	3,672	2,030	327	569	746

表 3.1.1-5 自主対策の動機（複数回答有り）

	回答数	土地売買	土地改変	土地資産価値	その他
平成 14 年度	670	335	82	23	230
平成 15 年度	867	418	133	27	289

3) 土壤浄化ビジネスの将来展望

・土対法の成立・施行

土対法施行以前の土壤汚染対策は、地方自治体の指導、土地所有者の自主的取り組みで行われてきた。土壤汚染の対策レベルとしては、行政の目標である土壤環境基準を達成するまで対策を実施することが目標とされてきた。しかし、環境基準まで浄化することは技術的、コスト的に対応が困難な場合があった。こうした場合、恒久対策として掘削除去以外の対策を採用すると、汚染の除去をしないかぎり本当の対策とはいえないのではないかという議論があった。対策が市民の安心感にかならずしもうまく結び付いていなかった。したがって対策のほとんどは公にされることなく、いわば内々に行われてきた。

一方、工場跡地の売却の際に、土壤汚染の調査を行う商習慣が近年定着してきた結果、汚染された土地の所有者はいわゆる「売り逃げ」することはもはやできない状況になってきた。どうせ対策をしなければならぬのならルール化してもらった方がよい。このような社会的要請をも背景にして昨年5月に土対法が成立し、平成15年2月15日に施行された。

・土対法施行の効果

土対法の施行により、公正でかつ透明な手続きや客観的な技術基準が制定されたことに伴って、土壤汚染対策事業が環境ビジネスとして社会に定着することになる。工事依頼者にとっても、工事施工者にとっても安心して調査・対策事業に取り組むことができるようになる。景気の動向にもよるが、これまで対策の技術基準がないために、工場跡地の再開発が凍結されていたケースもあったが、土対法が施行されたことにより、汚染された土地の対策が動き出すことが期待される。

また、指定区域が公示されることで調査・対策工事がオープンになると、調査・対策工事依頼者は、なるべく安く、短期間に確実に調査・対策工事を行える業者を選びやすく

なってくる。当然、調査・対策業者間の競争が激しくなるものと思われる。その結果、調査・対策技術の向上と工事の低価格化が進むものとみられる。工事依頼者側にとっては調査・対策を進めやすい状況が生まれよう。

・ 資産価値の保全と土壤汚染

土壤汚染対策は、土対法が施行される前から自主的に行われてきたわけであるが、これまでの自主的取り組みの全てが土対法の対象になるわけではない。土対法対応だけでは負の遺産といわれる土壤汚染への取り組みがスローダウンしかねない。土対法の施行により、対策に関するルールが明確化されたことで、土対法に準ずる形で土対法の対象外の自主的取り組みがこれまで以上に促進されることが大変重要となってくる。

3条調査の事前対応として操業中の工場敷地について、また、4条調査命令を回避するための事前対応として、工場周辺で地下水の飲用利用等が行われている場合は、操業中の工場敷地、または遊休地について、事前に自主的に汚染の早期発見、早期対策を行えば、汚染が拡散する前に対策を打てるので、結果として対策範囲を拡大させずに済むことから費用が少なく済む。しかも土対法の適用ではないので時間的余裕を持って対応すれば、費用の安い対策技術を採用できる。また、将来、敷地を売却する際に汚染対策を迫られ、予定価格で売れないというような事態を回避でき、かつ、いわば年賦払いで対策ができる。さらに、事前対応の場合は、法律に基づく調査ではないので汚染が発見されても指定区域に指定されることはない。

費用面でも施設の操業を停止してからの調査・対策では、その費用の捻出は貯金の取り崩しになるが、操業中であれば、まだ、生産による費用の捻出が可能である。こうした事前対応は同時に自社敷地の資産価値の保全を図ることになる。工場敷地についても工場の施設と同様にメンテナンス（維持管理）の必要な時代になってきたのである。

土壤汚染が重症になると浄化費用が高くなる。浄化ビジネス側にとって金儲けのチャンスになるかといえば、むしろ市場の死を意味することになる。土地の値段に比べて浄化費用が高い場合には、汚染土壌が放置されたままになるおそれがあるからである。工場・事業場の土地所有者にこうした理解の進むことが、浄化対策の推進ひいては市場の拡大にとって不可欠である。

・ 息の長い市場

土壤浄化事業は、一度浄化工事を依頼した顧客から、同じ場所について再度浄化を頼まれることは、まず、ないと思わなければならない。そのことから、土壤浄化事業は土対法ができたばかりの当座は活況を呈していてもリピーターがいないので、そのうち5,6年もすれば大したことはなくなる、と考える浄化事業関係者もあると言われている。そもそも土壤浄化事業はビジネスとして、今後の成長産業になるであろうか。こういった中長期的な将来展望について考察してみたい。

京浜、中京、京阪、北九州といった旧4大工業地帯は、戦前戦後を通じて日本の代表的な工業地帯であった。これに、新産業都市等の製造業拠点が次々と加わり、戦後日本の高度経済成長の主力を担ってきた。同時に、世界の工業地帯でもあった。

しかし、バブル経済の崩壊以降、急速に日本の製造業拠点がアジアなどへシフトするに伴い、旧4大工業地帯をはじめとする工業地帯が空洞化しつつある。その跡地などの再開発は、

景気対策としても大きな課題となっている。

戦前戦後を通じて半世紀以上にわたり、重化学工業コンビナート用地として列島改造により作られた旧工業地帯を再開発して、21世紀の少子高齢化時代の都市に生まれ変わらせ、昔の面影を一変するには、やはり半世紀くらいの期間を要するとみるのが妥当であろう。

その再開発の際、避けて通れないのが土壌汚染問題である。再開発の歩調に合わせて浄化事業が発生していくであろう。したがって列島改造バブルが再来しないかぎり、一時の携帯電話生産台数の伸びのような倍々ゲームで浄化事業が増えることはない。大量生産、大量消費、大量廃棄の社会システムにおける負の遺産とも言える土壌汚染を浄化し、それにより新たな発展を遂げることは歴史の流れでもある。新たな土壌汚染が今後発生することが無くとも、中長期的には土壌浄化ビジネスは、膨大な市場を抱えた、仕事の在庫量の十分にある、息の長いものであるといえよう。5,6年のブームで終わるような事業であれば、わざわざ法律まで作る必要はないのである。

・ 13兆円の推計と市場規模

社団法人土壌環境センターでは、土対法が制定される前の平成12年に、土壌汚染に係る調査対策費用の推計を行っている。この調査では、土壌汚染の調査費用は2兆3千億円、対策費用は11兆円、合計で13兆3千億円と推定している。これをもって、土対法の施行により“13兆円の市場を巡る熾烈な戦い”といった具合に、すぐにでも13兆円余の市場が生まれたかのように報じられることがあるが、本調査は土対法の対象となる市場規模を調査したものではないことを明確にしておく必要がある。

費用の推定には、当然、多くの前提条件がある。例えば、本推計では、操業中の工場等を含め、土壌汚染の存在が推定されるところは全て対策を行うことを前提にしているが、土対法では、必ずしも操業中の工場も含め、全ての土壌汚染について対策を義務付けているわけではない。また、汚染物質として土対法では対象となっていない油も、本推計には含まれている。

したがって、調査・対策サイト数の数え方、調査・対策手法などが同じではないので、土対法が施行されて直ちに13兆円の市場が一挙に生まれたということにはならないのである。さらにこうした前提条件に加えて、前述したような土壌汚染対策の対策レベルに対する市場の要求度合い、浄化ビジネスへの新規参入に伴う競争激化がもたらす工事費の低価格化競争、景気の動向に左右されやすい工場跡地の再開発需要など、複雑な社会現象の動向を考慮しなければ、市場規模の推計はできないことに留意する必要がある。

3.1.2 企業リスクとマネジメント

(1) はじめに

企業経営を行っていくということは、つねに、多くのリスクに囲まれていることを正しく認識し、あるリスクは克服し、あるリスクは避け、または他に転嫁しながら業績を上げていくことであると言える。

リスクの要因は、「人」、「もの」、「金」と「情報」に大別できる。「人」のリスクとは、例えば、企業の組織や経営システムが立派にできていても、その中で働く「人」にコンプライアンスを無視したり、軽視する人間がいるケースなどが挙げられる。また、コンプライアンスに一定の理解を持つ人間であっても、社会に大きなインパクトを与えるような人為ミスを引き起こせば、一気に企業の信用を失墜させてしまうこともある。このような事例は、毎日のように新聞紙上を賑わしている。

「もの」とは、企業の持つ有形資産である。これもいつの間にかに負の資産になっていることも多い。たとえば、最近の地震災害においても実際に起きたことであるが、主要な生産施設が地震に見舞われたり、あるいは火災にあえばそこでの生産活動が止まってしまうし、また、高価格で購入した土地が土壌汚染を抱えていたとしたら土地の価格は大幅に下がってしまう。減損会計法の導入により、以前にも増して企業は、土壌汚染に関するリスクへの対応を迫られている。

「金」のリスクは、投資リスクや為替リスクなどに代表され、この分野の対応は従来から各方面で行われてきている。ここであらためて説明するまでもないが、最近では金融工学なる学問に集大成されている。

「情報」のリスクとは、近年のIT技術の飛躍的向上と普及により、大量の情報のやりとりや加工が誰にでも容易にできるようになったため、また顧客の消費性向や購買意欲などといった情報の収集・管理が容易になり、かつ経済的価値も高まったため、情報漏洩などが企業経営に与えるリスクも一段と高まっている。

これらのリスクは、昔から存在していたわけだが、世の中が複雑化し、さらにIT社会化、国際化するに従い、これまでの企業が経験したことがないほど、経営環境の変化のスピードと企業活動の影響範囲は大きくなっている。このため、優れた経営者といえども過去の経験や個人の知識に基づいた判断だけではリスクを適正に処理することが困難になっている。

従来、経営コンサルタントとか金融コンサルタントと言われるビジネスがあり、まさに、企業経営の判断支援を行ってきたが、それらはどちらかというとな述の「ひと」、「金」にかかわるリスクを扱うことが多かった。

しかし、前述のような近年の急速な経営環境の変化のもとで、企業経営を取り巻く多くのリスクを、それぞれの分野の専門家集団が分析・評価し、その対応策を経営陣にコンサルタントするという「リスクビジネス」が生まれてきたと考えることができる。

(2) 「もの」リスクビジネスの事例

本節では、「もの」に関わるリスクについて、実際のリスクビジネスを展開している数少ない企業の一つである株式会社イー・アール・エスの協力を得て、同社が携わった事例を中心に、リスクビジネスの現状の一端を説明する。

ここで言う「もの」とは、前述したように、企業が所有する有形資産をあらわす。たとえば、建物や土地などの不動産や工場の生産施設などである。これらの「もの」が何らかの理由で価値が変動するという広い意味でのリスクに関してビジネスが展開されている。

同社では、大きく分けて次の3分野について事業が行われている。

企業の資産価値評価

土地の土壌汚染評価

地震などの自然災害や火災による災害リスク評価

以下では、これらの分野に関するビジネス動向やその背景について順に説明する。

(3) 資産評価ビジネス

SPC法(特定目的会社による特定資産の流動化に関する法律)が1998年9月に施行されたのに伴い、企業が持つ不動産を証券化する動きが一気に高まった。簡単に言うと、今まで所有していたビルなどの不動産を特定目的会社に移し、そのビルの価値を原資に証券を発行する。投資家は、そのビルの収益性をみて、証券を購入し、配当を受けるという仕組みである。

そのときに必要な機能の一つとして、デューデリジェンス(適正評価業務)と呼ばれる不動産調査がある。具体的調査内容としては、下記がある。

経済的調査(不動産の収益性分析、鑑定評価等)

法的調査(権利関係に関する調査等)

物理的調査(建物診断、長期修繕費用、地震リスク等)

デューデリジェンスは、不動産証券化の動きの中で広がったが、現在では不動産の相対取引や不動産投資信託(リート)でも欠かせないものとなってきている。

従来のがわが国における不動産評価は、公示価格・路線価等に準じた土地評価額に建物価格を加える程度のもので、実質的な価値を評価することは少なかった。事実、駅前の一等地のビルを購入したが、ビルの管理状態が悪く、長期修繕費用に多額費用が掛かったとか、耐震上に弱いところがあり補強費用が必要になったなどの事例もあった。言い換えると、不動産の証券化や相対取引によって、今まであまり考慮されていなかったリスク要因に対する認識が高まり、リスクを定量的に把握しておくというニーズが定常化してきたということになる。

リスクビジネスにおける一例として、株式会社イー・アール・エスでは、デューデリジェンスの中で、上記の物理的調査を主体とした業務が行われ、エンジニアリングレポートの形で成果が提供されている。

大項目としては、建物診断、緊急短期修繕費用、中長期修繕費用の算定、地震時の被害費用の算定、建物の環境評価、土地の汚染評価がレポートの内容である。対象物件については、当初、オフ

ィスビルが多かったが、最近では、ホテル、マンション、商用施設など建物全般に広がっている。さらに、ゴルフ場やレジャー施設、有料道路なども評価対象となってきており、こうしたことからリスクビジネス市場の拡大がうかがえる。

上述したように、不動産などの資産評価は必要不可欠なものとなってきているが、リスクビジネスを行う上で重要なことは、

- ・ 中立的立場で評価する
- ・ 定量的に評価する

である。

■ 建物デューデリジェンス(エンジニアリングレポート)

物的状況調査

・ 遵法性・再調達価格・短期/長期修繕費・地震リスク・管理状況など

権利関係 契約分析



環境調査

・ 土地利用履歴・環境汚染・有害物質の使用など

キャッシュフロー 分析、鑑定評価

- ・ 顧客のニーズに合わせ、多彩なメニュー
- ・ ERSブランド(中立性、高品質)の浸透

図 3.1.2-1 デューデリジェンス(不動産の適正評価業務)の概要

(4) 土壌汚染評価ビジネス

環境問題の大きな高まりの中で、土壌汚染の評価も避けては通れない問題となっている。完成間近のマンションが敷地の土壌汚染を隠して工事を進めたことに対し、周辺住民からの苦情・通報が寄せられた結果、建物を取り壊すことになったという事例も数年前の出来事である。また、工場敷地から汚染水が流れ出し、周辺の地下水を規定の数千倍の濃度で汚した出来事も最近の出来事である。汚染された土地や工場を所有していることや汚染された土地を知らずに購入することは、企業経営上大きなリスクである。

2000年には、東京都公害防止条例の中で、大規模開発に際しては、土壌汚染チェックのため土地の履歴調査が義務付けられた。その後、2003年2月には、土壌汚染対策法が施行され土地の取引では必ず土壌汚染調査をすることになっている。

こうした法的な規制が整備される以前から、生産工場等で有害物質や油、重金属を使用しているところでは、土壌汚染が内部の問題として認識されていた。該当する企業では、内々に土壌環境の調査をし、汚染されていれば周辺に知られないように浄化工事を進めていた。周辺住民へ知られて工場の操業が止まることへの危惧から、内々で処理を進めていたということである。

しかし、この種のリスクは隠せば隠すほど、更に大きなリスクになることがいくつかの事例で明らかになってきている。

本節では、土壌汚染に関するリスク評価をビジネスとしている企業の具体的な事例に基づいて、土壌汚染リスクビジネスの現状や動向について調査した。調査は、株式会社イー・アール・エスの協力を得て実施した。

同社の土壌汚染評価事業は、下記のように構成されている。

簡易評価 (Phase1 評価) :

購入したい他社の土地などは、その土地に立ち入って、ボーリング調査やサンプル採取ができない。候補の土地が複数個あり、いずれを購入するかが決まっていなような場合である。

Phase 1 調査では、その土地と周辺の状況を現地に行き調べる、過去の使用履歴を調べる、できればヒアリングを行う等の簡易調査によりその敷地が汚染されているかどうかの可能性を判定する。

詳細調査 (Phase2 評価) :

Phase1 調査で汚染の可能性があると判断された場合には、現地に入りボーリング調査やサンプル採取を行い汚染物質の特定や汚染範囲の推定を行い、対策提案までも必要に応じて行う。

土壌汚染評価ビジネスは、企業買収や合併、土地取引など土地の流動化が盛んになるほどニーズが高くなっている。さらに、土地の鑑定分野でも、土壌汚染の可能性が土地の価格へ反映されようとしている。また、土地の担保価値評価でも土壌汚染評価を考慮するようになってきている。ある意味で、当然のことながら、今まで土地をもつことに土壌汚染のリスクを考慮していなかったことが問題である。ここでも、重要なのは土地取引や浄化工事業者など利害関係のない中立的評価と説明できる定量評価、さらに専門家による評価ができることである。

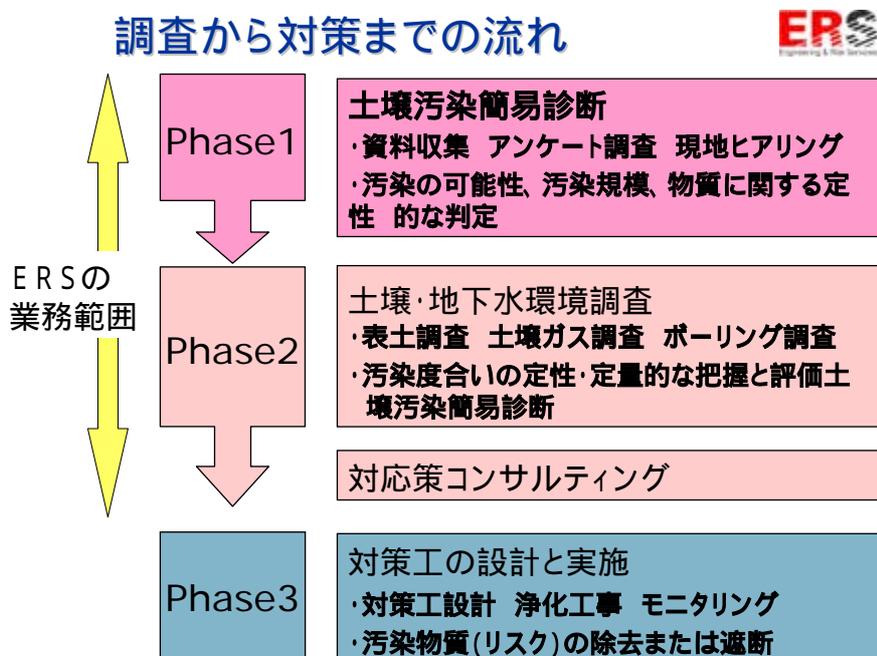


図 3.1.2-2 土壌汚染リスクビジネスにおける業務フローの一例

(5) 災害リスク評価ビジネス

日本は世界有数の地震国といわれる。さらに、台風や水害など自然災害が毎年のように起きている国でもある。このような国で事業を行う企業にとって、自然災害は避けて通れないリスクである。

地震については、東海地震、南東海地震、南海地震といった巨大地震のリスクが年々高まっており、宮城沖地震においては、今後30年間に起こる確率が90%以上とも言われている。このような地震が起きれば、兵庫県南部地震がもたらした大災害からもわかるように複雑化した社会では、とてつもない被害を被ることは事実上、避けられないと言うべきであろう。

企業経営にとって、地震による被害は多大な損失を蒙ることから、多くの企業で耐震診断や耐震補強を行っている。しかしながら、耐震補強は建物や工場等の構造物を強化するにとどまり被害の一部を低減しているに過ぎない。

地震リスクといえば、人命の損失、建物や施設の物的損失のみならず、操業中断による営業損失がある。人命損失はあってはならないことであるので別にすると、企業経営にとって、物的損失より操業中断による損失のほうが影響は大きい。操業中断は長引くと、シェアの損失や株価の低下等をもたらす、企業存続に多大の影響を及ぼす。工場の建物が無被害でも、中にある生産設備・機器が損傷すれば操業中断に陥る。また、自社の施設が無被害でも、電気、ガス、水道等のインフラに被害が出ると操業中断となるし、周辺の道路が通れなくなると物流に関する損失が発生する。さらに、材料や部品を供給している取引先の会社が生産中止になることによっても、操業はできなくなる。

地震、風水害によるリスク評価と火災による損失評価をビジネスとしている企業の一例として、株式会社イー・アール・エスの事業を中心に、以下では当該分野におけるリスクビジネスの動向について調査結果を述べる。

同社の災害リスクビジネスでは、全国各地での災害の発生確率を求めるハザード評価を行い、それに基づいて物的被害と操業中断被害、さらに被害を損失額として定量的に評価している。このようにリスクをトータルで評価することにより、対策の投資効果やリスク転嫁策への経営判断支援が可能となっている。

火災について少し具体的に述べると、従来から建築基準法による建設時の規制と消防庁による定期管理はなされているが、使われ方に関してはチェックが十分に行われていない場合もある。例えば、スプリンクラーの設置や消火器の設置が法規制を満足していても、新宿の雑居ビル火災のように非常階段が物置き場になっていたとか、燃え草となるような物が雑然と置かれているような場合には、火災時のリスクは低減されない。

同社のファイアリスク指数では、ハード的要因とソフト的要因を頻繁にチェックすることにより、火災発生時の燃え広がりを極力減セルかどうかについて定量的な評価が行われている。簡易的なFR(ファイアリスク)指数でハード・ソフト両面から火災リスクを評価することにより、不動産の売買や日常管理、火災保険交渉などに初めて有効となる。

災害リスク評価でも、中立的評価、定量評価、専門評価が重要なポイントとなる。このような評価のニーズは年々高まってきており、民間企業のみならず、公共施設でのニーズも多くなってきている。災害時には、役所、学校、病院などそれぞれが、防災拠点として果たす役割は大きい。さらに、緊急用道路機能を確保するために電柱等の障害物をどうするか、住宅密集地をどうするかなど災害リスクの観点から、防災計画を見直す動きも出てきている。

(6) まとめ

企業経営の4要素、「人」、「もの」、「金」、「情報」のリスクのうち、「もの」に関するリスクビジネスについて、実際にリスクビジネスを展開している数少ない企業(株式会社イー・アール・エス)の協力を得ながら考察した。

我々が買い物をする時に、パンフレットを比較検討し、店に足を運んで現物を触ってから買うかどうか(出資するか)を判断するように 企業経営でもリスク評価をしたうえで投資を決めるのは当然であると思われる。しかしながら、わが国では、リスク評価が十分に行われているとは思われない。理由はいくつかあると思われるが、「もの」に関するリスク評価を、専門的に、中立的かつ定量的に行うところがなかったせいではないかと考えられる。株や投資などの金融の世界ではリスク評価は当然のことであり、金融リスクを専門に扱う会社は数多い。今後、同社のような会社が数多く出てきて「もの」リスクビジネス市場が広がっていくことを期待したい。

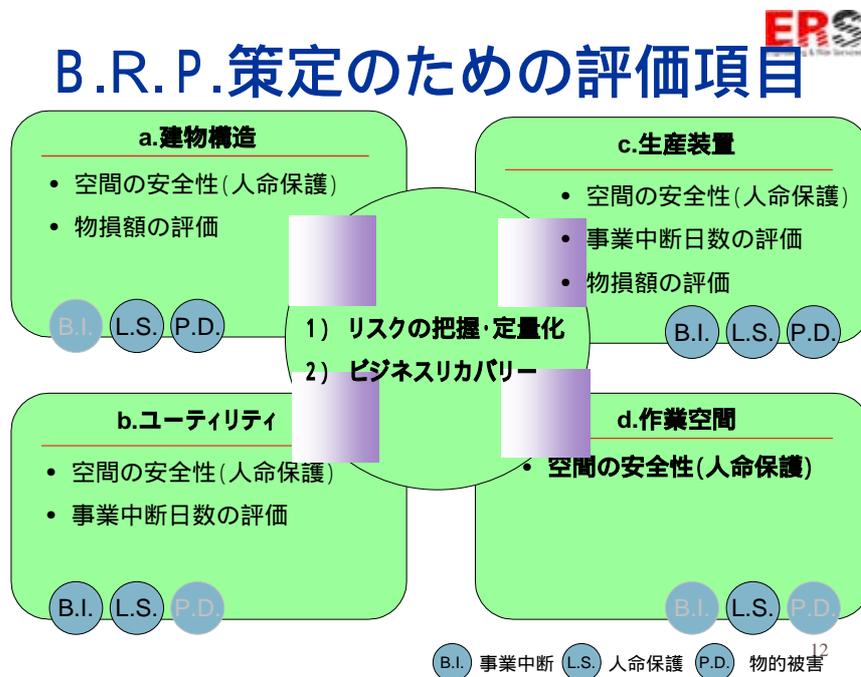


図 3.1.2-3 事業継続性に対する障害を取り除くための活動であるBRP(Business Recovery Plan) 策定の概念

3.1.3 汚染調査技術の開発動向

従来の汚染調査技術の問題点、あるいは従来技術が比較的得意とする測定対象物質を把握し、迅速分析技術に対するニーズの確認を目的として、土壌のオンサイト迅速分析を目指した技術の開発動向を調査した。技術動向を調査することにより、測定対象とすべき汚染物質など、本調査研究で取り組むべき技術開発の方向性を適切に検討することが可能となる。

土壌汚染の防止・対策技術に関する複数の有力学会における最近の研究報告として、下記を調査した。

- 地下水・土壌汚染とその防止対策に関する研究集会論文集（平成 16 年度版、全 820 頁）
全報文を概査し、それらのうち 17 件について詳細に調査した
- 地下水・土壌汚染とその防止対策に関する研究集会論文集（平成 15 年度版、全 550 頁）
全報文を概査し、それらのうち 14 件について詳細調査を実施
- 環境地盤工学シンポジウム講演論文集（平成 15 年度版、全 200 頁）
全報文を概査し、それらのうち 3 件について詳細調査を実施

なお、上記の研究集会、シンポジウムの概要は下記のとおりである。

、 について

- 主 催：日本地下水学会、(社)日本水環境学会、(社)地盤工学会、(社)土壌環境センター
- 開 催：平成 16 年 7 月 14 日～16 日（ ） 平成 15 年 6 月 19 日～20 日（ ）

について

- 主 催：(社)地盤工学会
- 開 催：平成 15 年 7 月

技術動向調査の結果、以下のことが確認された。

1) 重金属を対象としたレーザー分光による迅速計測技術の革新性

以下のことから本技術の革新性、並びに本研究計画の妥当性が確認された。

- ・ 試料採取を伴わない技術は、試薬の変色を用いた方法など一部の定性判定技術に留まる。
- ・ 蛍光 X 線直接分析法も測定誤差が大きく、前処理や試料の状態の影響を強く受ける。

2) 既存技術では、精度向上と迅速化の両立が困難

- ・ 既存技術の開発方向は、手作業によるラボ分析技術の延長上にあり、高密度な調査の阻害要因である試料採取を伴うもので、また分析精度を確保しようとするれば煩雑な前処理が不可欠である。
- ・ 上記のように、既存技術は従来のラボ分析における、分析操作の時間短縮や簡易化といった技術改良に留まっている。溶出等の前処理を経て、重金属を溶媒に抽出後、分析機器に通すため、溶媒への抽出を簡略化すると精度低下が避けられない。

- ・重金属の分析では、1時間も要する前処理（溶出）の問題、急速に溶出した場合の精度低下の問題がある。

3) 原位置で迅速に重金属汚染を判定する技術のニーズ

- ・重金属分析の原位置・迅速化のための新技術（酸を用いた溶出法、ホルツマトリ法など）の研究報告が多い。困難な課題への関心やニーズの高さを反映したものと考えられる。

4) 既存技術が比較的得意とする分析対象物質（VOC等）

- ・揮発性有機化合物（VOC）や油の揮発成分を対象とした迅速分析技術には、予め測定対象とする汚染物質を特定することが可能であれば、現地でもある程度の精度で測定できる技術が開発されつつある一定の精度が得られるものがある（可搬型ガスクロなど）。

従って、重金属汚染を現地で計測する技術の開発が、取り残された形となっている。

3.2 測定対象物質の検討及び計測システムの条件検討

本節では、土壤環境汚染計測機械システムが具備すべき機能や、将来の実用化に向けた開発の条件について検討した。

はじめに、汚染調査機械システムのご概念について説明した後、機械システムの開発条件に関するご検討について述べる。

(1) 汚染調査機械システムの概念

汚染調査機械システムの概念を図 3.2-1 に示す。

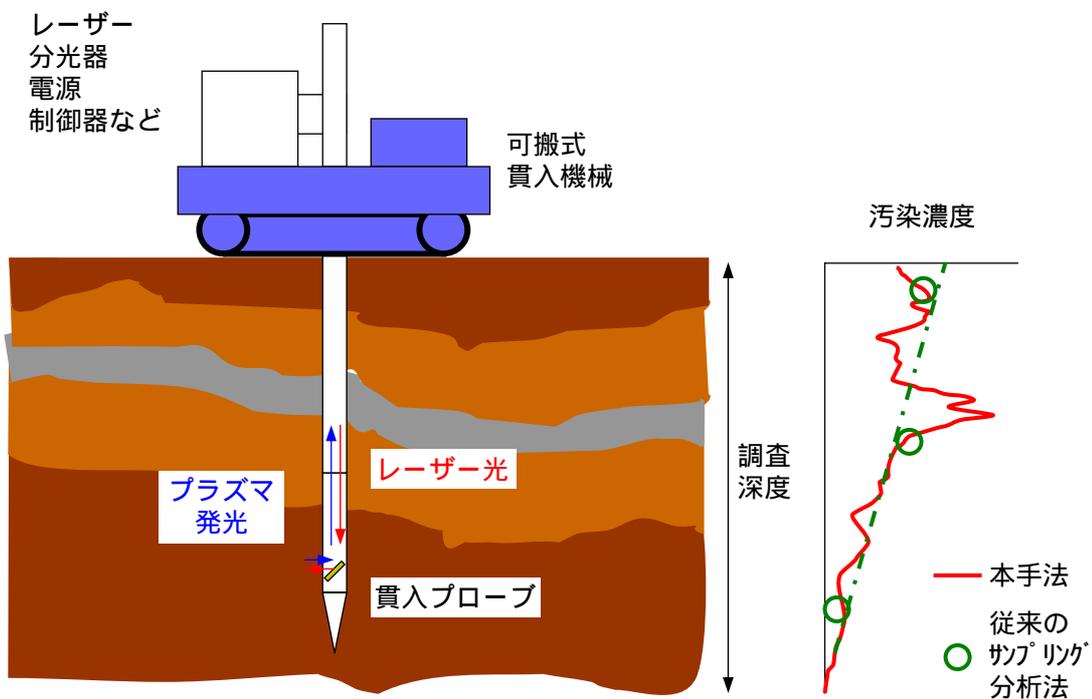


図 3.2-1 汚染調査機械システムの概念

図 3.2-1 で、地上の可搬型貫入機械には、レーザー光源、電源、分光器、制御器などが搭載される。地中に貫入されたプローブには、側面にレーザー光及びプラズマ光を透過するための窓部が設けられており、所定の深度でレーザー光の照射や、土壤表面で発生したプラズマ光の収集を可能としている。

本機械システムの一連の動作（効果）は、以下のとおりである。

地上のレーザー光源が発生したレーザー光は、貫入プローブ内に設けられた導光路（曲がり部にミラーを用いた中空管あるいは光ファイバなど）を通り、貫入プローブ先端に達する。貫入プローブ先端には、土壤と接する側面に窓部が設けられており、その窓部を通して外側の土壤表面にレーザー光を集光するための集光レンズが設置されている。レーザー光をレンズで集光することに

より、土壌表面にプラズマ発光が生ずる。発生したプラズマ光を凹面ミラーや集光レンズ等で集め、再び導光路に結合させて地上の分光器まで導く。分光器を用いてプラズマ発光のスペクトルを求め、発光スペクトルを分析することで、汚染物質の有無や程度などを判定する。測定の平面的な位置や深度の情報と組み合わせれば、2次元あるいは3次元な汚染状況の把握が可能になる。

従来の試料採取に基づく汚染調査と比べて、本機械システムには下記のような新しい機能あるいは効果が期待される。

従来のサンプリングに基づく調査では、得られる汚染の情報が不連続であるため、試料採取地点の選定を誤ると、浄化対策を必要とする場所を見逃すことになる。汚染の見落としを避けようと、高密度のサンプリングを行えば、分析すべき試料点数が膨大となり、調査コストの増大を招く。

一方、本機械システムが実現すれば、現場で連続的な汚染データを取得できる。試料のサンプリングを伴う方法と異なり、調査箇所の高密度化が即座に調査コストの増加につながらないため、汚染の面的さらには3次元的な分布状況の把握も可能になると考えられる。これにより、早期に適切な対策を選定し、効果的なリスク管理が行えると期待できる。

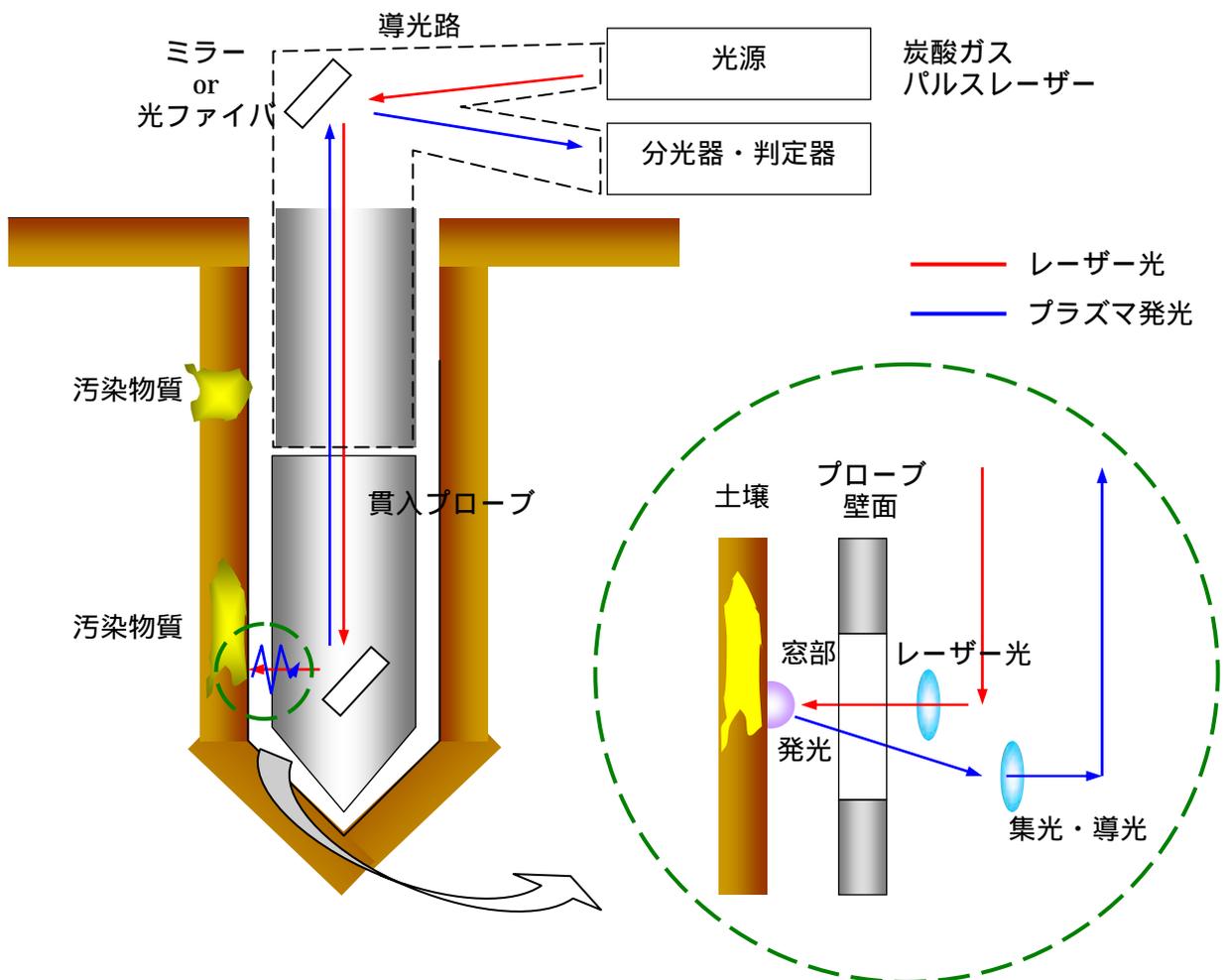


図 3.2-2 汚染調査機械のシステム構成図 (イメージ図)

(2) 機械システムの開発条件に関する検討

土壌汚染計測モニタリング機械システムの将来の実用化に向けた開発の条件について検討した。検討した項目は、下記のとおりである。

- 測定対象とする重金属元素の選定
- 目標とする検出性能（検出濃度）の設定
- 目標とする調査深度の設定

以下、順に上記項目の検討内容を示す。

測定対象とする重金属元素の選定

本汚染調査機械システムが測定対象とする汚染種は、3.4 汚染調査技術の開発動向で述べた理由により、重金属に絞った。

土壌汚染の実態に関する統計資料（環境省：土壌汚染調査・対策事例及び対応状況に関する調査結果の概要）によれば、汚染発覚事例数の多い重金属元素は、鉛、ヒ素、クロム、水銀であり、これら上位4元素で重金属汚染全体の80%近くを占める。これらの元素は測定ニーズも高いため、これらを本調査機械システムが測定対象とすることが妥当である（図3.2-3参照）。

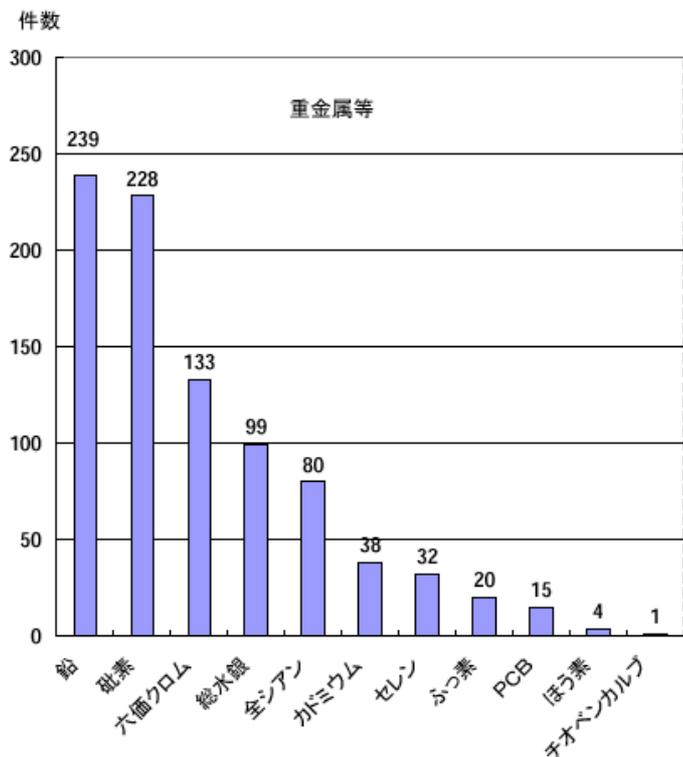


図 3.2-3 重金属類の汚染超過事例数
（環境省：土壌汚染調査・対策事例及び対応状況に関する調査結果の概要による）

目標とする検出性能（検出濃度）

上記4元素の土壤含有量基準値は、Pb: 150 mg/kg、As: 150 mg/kg、Cr: 250 mg/kg、Hg: 15 mg/kg となっている。レーザープラズマ分光分析技術によるリアルタイム土壤分析の可能性を評価し、技術的な実現の見通しを得るという今年度の目的から、当面は 100mg/kg 程度の検出性能を得ること、あるいは定性分析が可能な程度の検出性能を得ることを目標とし、検出性能の向上は、土壤を対象としたレーザープラズマ誘起及び発光技術の実用知見の確立を進めながら、実用化をめざす技術の開発段階で追求することとした。

なお、オンサイトでの迅速分析という制約条件を満たした上で 100mg/kg 以下重金属を検出できる技術は国内外を通じて開発されておらず、この目標が達成されれば、本研究成果の意義は大きい。

先行する研究事例として、米国やイスラエルの軍事関連研究機関などで、YAG レーザー（Yttrium Aluminum Garnet Laser）を用いたレーザープラズマ分光分析法、すなわち一般に LIBS（Laser Induced Breakdown Spectroscopy）法と呼ばれる方法（3.6.1 レーザープラズマ分光分析法に詳しく述べる）を土壤中の重金属検出（室内実験）に適用した研究事例が見られる。しかし、これらの事例では、オンサイトでの迅速分析には実施困難と思われるほどの過大な荷重をかけて、土壤試料を加圧することにより、分析感度の向上が図られている。実用性の観点から、このような感度向上策には課題があると言える。

こうしたことから、本調査研究が目標とする検出性能は、オンサイトでの迅速分析を目指す上で、実用性を犠牲にすることなく達成可能な水準とする必要がある。

重金属の種類	含有量基準
鉛及びその化合物	150mg/kg 以下
ヒ素及びその化合物	150mg/kg 以下
物六価クロム化合物	250mg/kg 以下
水銀及びその化合物	15mg/kg 以下

表 3.2-1 汚染判明事例数が上位の重金属 4 種に関する基準値

目標とする調査深度

本調査研究で将来開発を目指す機械システムが、目標とする調査深度を設定するにあたり、現状の試料採取を伴う調査における技術指針及び、土壤汚染の統計資料に基づく汚染の実態を参考とした。

環境省の指針では、重金属等による汚染の範囲を確認するための調査（詳細調査）において、有害物質の到達深度を求めるための調査は、これまでの汚染実態を考慮して、5m を目安とすることが妥当であるとされている。

なお、比較的浅部に難透水層が存在するために到達深度がわずかであるにもかかわらず、一律に 5m までの調査を行うことは、措置実施者の経済的負担の増加要因となる恐れがあるため、地質状況等により到達深度が小さい場合には 5m 以浅の調査深度とすることも可能であると、同指針には述べられている。

土壤汚染の統計資料に基づく汚染の実態については、環境省がまとめた「土壤汚染調査・対策事例及び対応状況に関する調査結果の概要」を参考にした。

この調査結果概要に記載された土壤汚染判明事例の統計によれば、深度不明とされた事例を除くと、深度 0～5m の汚染発覚事例が、汚染超過事例全体の 90%以上を占めることが分かる（図 3.2-4 参照）。

以上のことから、目標とする調査深度は 5m に設定した（以上の検討に際しては、下記の資料を参考とした）。

「土壤汚染対策法に基づく調査及び措置の技術的手法の解説」、監修：環境省、編・発行：社団法人土壤環境センター、平成 15 年 9 月

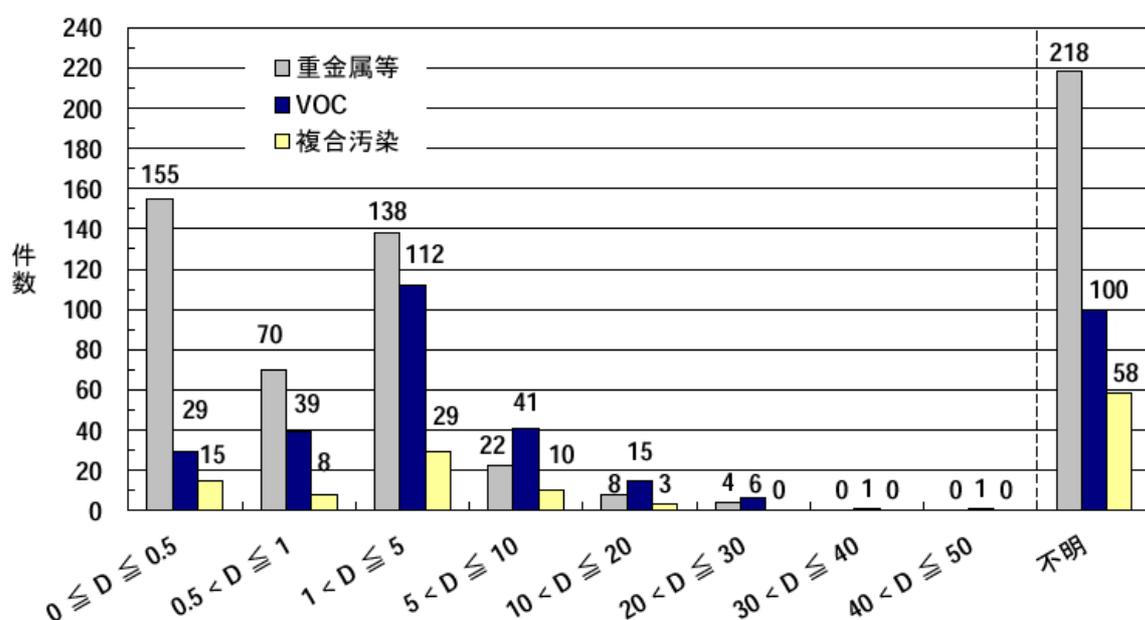


図 3.2-4 深さ別の土壤汚染判明事例数
（環境省：土壤汚染調査・対策事例及び対応状況に関する調査結果の概要による）

なお、将来的に 5m 以上の深度についても調査可能な機械システムを開発することが必要になった場合、想定される技術的課題として、下記を挙げる事ができる。

プラズマ光の導光路に関する課題

地中に貫入したプローブから、窓部に接する土壌に向けてレーザーを照射すると、プラズマ光が発生するが、その発光を地上の分光器に伝送する際、光ファイバーなどの導光路が必要となる。

光ファイバー導光路は、伝送光の波長に依存した損失特性（伝送光の減衰、及び減衰の周波数依存性）をもつため、10m あるいは 20m といった伝送距離の場合には、減衰が大きくなり良好なスペクトル分析が困難となる波長域が出てくると懸念される。こうした理由のため、現状の分光分析システムでは、導光路として用いられる光ファイバの長さは、通常 3m 程度とされている。

特に、紫外領域の中でも波長の短い光については、光ファイバの伝送損失が著しいという現状技術の課題がある。

貫入装置に関する課題

レンズやミラー、光ファイバなど精密な光学機器を搭載したプローブ部を地中に押し込む際、一般に打撃や回転は避ける方が望ましいと言える。従ってプローブは、貫入により地中へ送り込むことになると考えられるが、貫入によってプローブを地下へ送り込むためには、貫入装置には大きな反力を受け止める能力が必要となり、必然的に装置には大きな重量が要求される。

装置が大重量化することは、装置の大型化にもつながるため、現場の調査における機動性の低下が懸念される。20m といった大深度への貫入に対応可能な機械システムを開発する場合には、装置の貫入能力と機動性のトレードオフを解決する検討が必要である。

3.3 レーザープラズマ分光法の適用性検討実験

レーザープラズマ分光分析法は、前処理の省略が可能、多成分を同時に分析できるといった特長を持つため、オンサイト・リアルタイム環境分析の実現を目指す上で強力な技術である。

また近年、コンクリート構造物の劣化を引き起こす中性化の迅速検査技術としての可能性が見出されるなど、現在も困難な広範囲の迅速調査を実現するためのブレイクスルー技術になりうるとして研究が進展しつつある¹⁾。

土壤汚染の分布を現地で迅速に調査する技術は現在確立されておらず、上記のような特長を持つレーザープラズマ分光法を中核技術とした機械システムの開発が待たれるところであるが、重金属土壤汚染に対するレーザープラズマ分光法の適用可能性については、未解明の事項が多く残されている。レーザー分光法による土壤中の汚染物質検知に関する研究事例が非常に少ないことが理由の一つである。また、場所による性状変化が多様であり、かつ微視的にも性状が不均質である土壤という測定対象に適したレーザープラズマ生成技術が確立されていないことが、汚染調査機械システム開発の大きな阻害要因となっている。

本調査研究の最大の課題は、土壤の分析に適したレーザープラズマ生成技術の確立にあると言える。土壤のような複雑で不均質な物質に対するレーザー分光法の適用性は、土壤性状をモデル化した実験によって確認することが重要である。

以上の理由により、本調査研究では、土壤環境計測に関するレーザープラズマ分光法の適用可能性を評価するための基礎実験を実施した。本節では、基礎実験の内容と結果について述べる。

3.3.1 レーザープラズマ分光分析法

一般にプラズマとは、正負の荷電粒子を含む電離状態の気体のことである。物質の温度を上昇させると、固体から液体、そして気体へと状態が変化する。気体をさらに高温にしていくと、分子は解離して原子となり、原子が電離して電子とイオンになる。この状態がプラズマである。プラズマ化した領域では高いエネルギー状態にある原子や分子の発光が観測される。雷の発光も空気がプラズマ化したものである。

分光計測に用いられるプラズマの発生源としては、燃焼炎のような化学反応、放電、あるいは高強度のパルスレーザー照射などがある。気体中あるいは固体表面に高強度のパルスレーザーを集光して照射すると、レーザー光の強力な電場は、原子や分子内で荷電粒子を結びつけているクーロン電場を上回るようになり、その結果、原子からは電子が放出され、加速されてレーザープラズマが生成、維持される。

図 3.3.1-1 はパルスレーザーの照射によって発生するプラズマである。中心で白く輝いている部分はパルスレーザーの照射直後に発生する高温・高密度のプラズマである。このプラズマからは、強い連続スペクトル（広い範囲の波長成分を含む光）が放出される。分光計測において、連続スペクトルはノイズ成分となるもので、微量物質を検出するためには連続スペクトルの発生をできるだけ抑えるようなレーザープラズマ生成技術が重要となる。

一方、図 3.3.1-1 のプラズマ周辺部に見られる青や紫の領域は、測定対象物質を構成する原子のスペクトル線を放出しながら、時間と共に半球状に広がっていくプラズマである。すなわち、この

領域の発光スペクトルには、測定対象物質を構成する原子の種類と量に関する情報が含まれている。プラズマ発光のスペクトル上に観測される線スペクトルの波長から元素の種類を知ることができ、その発光の強さから当該元素の量を知ることができる（図 3.3.1-2）。

これらのプラズマの発光特性は、レーザー光の波長、エネルギー密度、測定対象物の硬さ、光吸収特性、雰囲気ガス圧等に依存する。

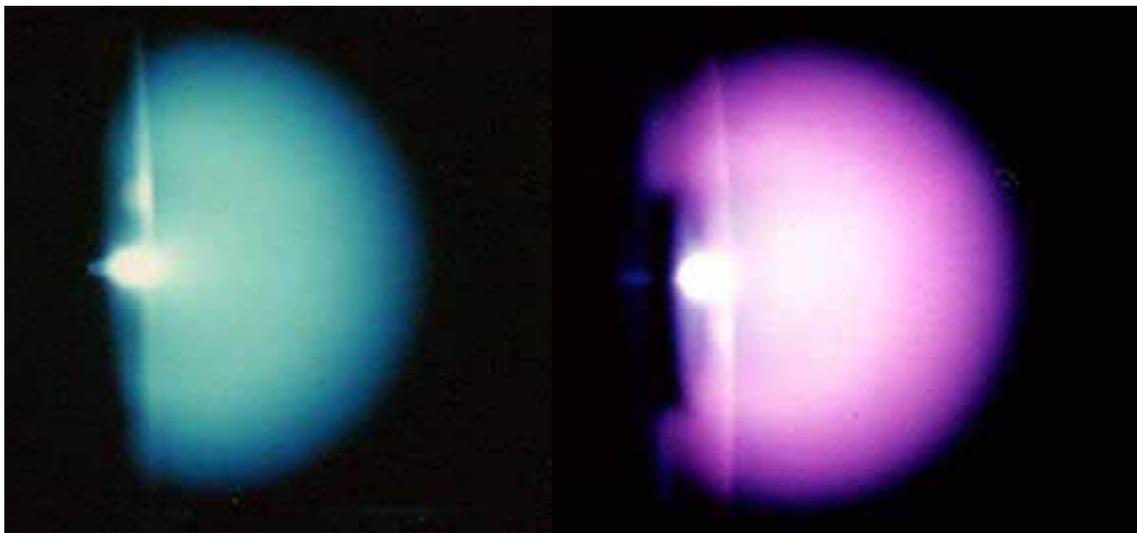


図 3.3.1-1 パルスレーザー照射により発生するプラズマ

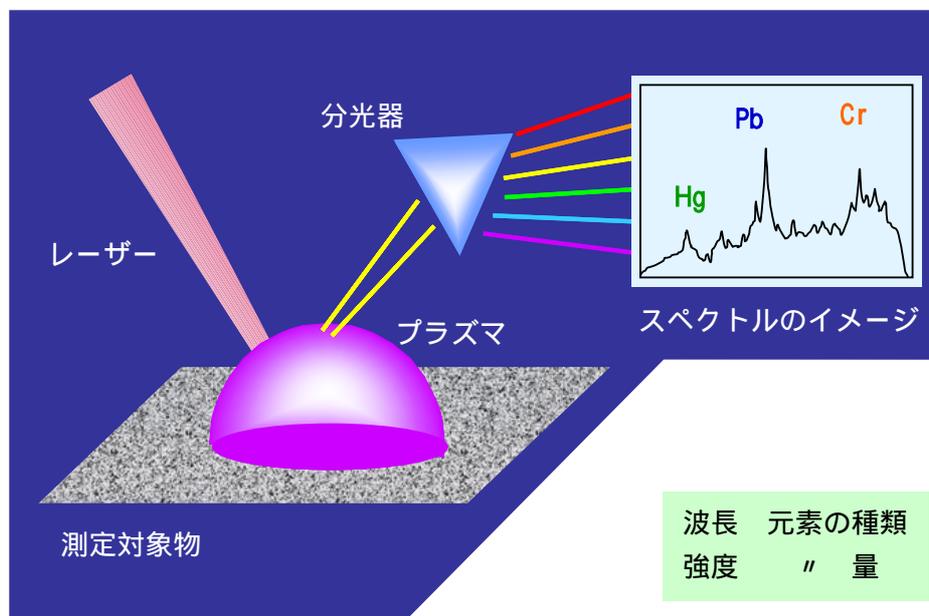


図 3.3.1-2 レーザープラズマ分光分析法の概要

レーザープラズマ分光法の特長の一つに、固体の直接分析が可能という点がある。高感度でかつ迅速な分析に対するニーズの高まりとともに、原子吸光 (AAS、Atomic Absorption Spectrometry) 法や高周波誘導結合プラズマ (ICP、Inductively Coupled Plasma Spectrometry) 法といった発光分光分析法が広く利用されてきている。しかし、これらの分析法は溶液状の物質を測定対象とするもので、固体試料の分析では、測定対象物質を溶媒に抽出あるいは溶解する作業、いわゆる前処理が必要になるというオンサイト・リアルタイム分析の実現における大きな課題がある。これに対して、固体試料を特別の前処理なしで、そのまま分析できるレーザー発光分光分析法が、レーザーの性能と実用性の向上、及び分光分析装置である OMA (Optical Multi-channel Analyzer) の普及により、近年急速に発展してきた。

レーザープラズマ分光法における実験機器構成の概要を図 3.3.1-3 に示す。

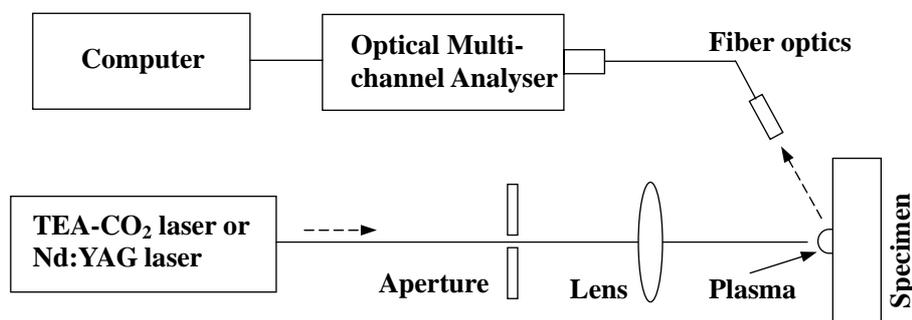


図 3.3.1-3 レーザープラズマ分光分析法の実験機器構成

本図において、発振器から出たレーザー光は、分析に必要な光エネルギーだけを透過させる Aperture (開口部) を経由し、レンズによって測定対象物の表面に集光される。短パルスレーザーが発生するレーザー光は、光強度の尖頭値が高いため、集光すれば容易にプラズマを発生させることが可能である。このプラズマ発光を、光ファイバやミラーなどで構成される導光路により、多チャンネル分光器 (Optical Multi-channel analyzer) へ導くことで、分光スペクトルが得られる。以上が、レーザープラズマ分光分析法における主要な機器の構成と役割である。

レーザープラズマ分光分析法の主な特長は、以下のとおりである。

試料の前処理をほとんど必要としない。

蛍光 X 線分析法により、土壌のような粉体試料を分析する場合、結合剤 (バインダー) と混合し強力に加圧成型する必要があるが、かつその表面は可能な限り平滑で均一でなければならない。こうした前処理は、オンサイト分析の妨げとなる。

空気中でも分析が可能で、また操作も比較的簡単である。

電子顕微鏡などの電子線を用いる分析法では、電子が試料に届くまでに大気中のガス分子など他の分子に衝突しない程度の真空が必要になるが、レーザープラズマ分光分析法では特に真空にする必要はない。

試料が絶縁体であっても、そのままの状態での分析が可能である。

EPMA (Electron Probe Micro Analyzer、電子プローブマイクロアナライザ) 法などの電子ビームを用いる分析法では、試料が絶縁体の場合、帯電による測定への影響を取り除くために、試料表面にカーボンや金のコーティングが必要になるが、レーザープラズマ分光分析法ではその必要がない。

直径十～数百 μm といった微小部分、または微量の分析が可能である。

レーザー光の波長やビームの特性にもよるが、集光することで微小領域の測定が可能である。

しかしながら、次のような課題も存在する。

高強度のパルスレーザー光を照射すると、分光スペクトル上の広い波長範囲にわたって分布する連続スペクトルが強くなりやすい。その結果、元々小さなピークである微量元素の線スペクトルに重畳して、微量検出が難しくなる。

試料の硬さ、光吸収特性等の性質や、雰囲気ガス圧の影響を受ける。

蛍光 X 線分析法にも類似した特徴が見られるが、レーザー分光分析法の分析感度は、試料の硬さの影響を受けることが知られている。例えば、米国やイスラエルの軍事研究機関による研究報告では、分析感度を向上するために 75g 程度の土壌試料に対し、20t もの荷重を 1 分間もかけるといふ前処理が行われている³⁾。また、試料を構成する物質の光吸収特性により、分析に適したレーザー光のエネルギー密度が異なると考えられる。さらに、雰囲気ガス (レーザー光照射部位の周辺に存在するガス) の圧力や種類によって、プラズマの発光スペクトル上に現れる測定対象元素の発光強度とバックグラウンドの発光強度の比が異なる。

これらがレーザー分光分析法の適用における問題点となっており、より広範な分野への応用を妨げている要因であると言える。

このような特長を持つレーザープラズマ分光分析法は、以下の二つの方法に大別することができる。

一つは、YAG レーザー (Yttrium Aluminum Garnet Laser) を用いるもので、一般に LIBS (Laser Induced Breakdown Spectroscopy) 法と呼ばれ、世界中で行われているレーザープラズマ分光分析の大部分はこの方法によっている。

もう一方は、励起光源に TEACO₂ レーザー (Transversely Excited Atmospheric Pressure Laser) を使い、減圧下でレーザー照射する方法であり、分光スペクトルのバックグラウンドが低いという分析上の利点を有する。この方法はレーザー誘起衝撃波プラズマ分光分析法 (LISPS、Laser Induced Shock Wave Plasma Spectroscopy) と呼ばれている²⁾。

レーザープラズマ発光現象の物理機構については、現在も未解明な点が多く残されているが、レーザー誘起衝撃波プラズマ分光分析法 (LISPS) に関する研究によって、衝撃波モデルに基づくレーザープラズマ発光現象の説明がなされており、衝撃波が重要な役割を担っていることが実験的に

示されている。このことはレーザープラズマ分光技術の確立を図る上で、注目すべき成果である。

衝撃波モデルによれば、パルスレーザーの照射によって、はじめに高温・高密度の Primary Plasma が生じ、それにより試料表面の原子が超高速で噴出する。噴出した原子は周囲のガスと衝突し、圧縮されて衝撃波が発生する。この衝撃波の背後に存在する高温領域中で、噴出した原子が熱的に励起されると考えられている。このような励起過程で発生するプラズマ状態は Secondary Plasma と呼ばれ、この Secondary Plasma の発光を検出、分析することで、試料を構成する原子の情報が得られる。

土壌の分析に関しては、砂や粘土といった土壌を構成する物質の硬さあるいは水分が、レーザー照射時に発生する衝撃波の速度や強度に影響を与えると予想されるため、土質や土壌の締固め度、水分含有量などが分析感度に影響を与えられられる。

海外におけるレーザープラズマ分光研究は、LIBS 法によるものが大半であり、かつその多くには物理現象の解明に重点を置くことなく、単にレーザーの照射エネルギーを強大にして検出感度の向上を図った事例や、また、オンサイト分析としては過大な荷重をかけて土壌試料を加圧することで分析感度の向上を図った事例などが見られる。しかし、土壌分析の困難を克服するためには、上記の衝撃波モデルのように物理現象に踏み込んだ研究や実験的検討が必要である。

衝撃波プラズマを利用したレーザー誘起衝撃波プラズマ発光分光分析 (LISPS) には、次のような特長がある。

Secondary Plasma の形状は、対称性のよい半球状であり、そのため再現性のよい分析ができる。

バックグラウンドとなる連続スペクトルが非常に小さいため、高い感度で測定対象元素を検出できる。

プラズマの発光が自己吸収を生じにくい薄い層状構造である。そのため、発光スペクトル線の強度と元素濃度との間により比例関係が見られる。

プラズマの温度が高いため、一般に検出が困難とされている励起エネルギーの高い元素に対する検出も期待できる。

このように、レーザー誘起衝撃波プラズマは、発光分光分析の光源として優れた特性を有しているといえる。

衝撃波プラズマを利用したレーザープラズマ分光分析法による最近の研究事例として、コンクリート中性化の検出に関する研究がある¹⁾。当該研究では、コンクリート中に浸透した炭酸に由来する炭素をレーザープラズマ分光分析法により検出することで、中性化の度合いを定量的に評価する手法が提案されており、その有効性が実験的に検証されている。

また、上記の研究では、YAG レーザーと TEACO₂ レーザーを用いた場合の分析性能の比較がなされている。それによれば、YAG レーザーを用いた場合、バックグラウンドの連続スペクトルが強くなるため、信号 (波長 247nm の炭素発光) 強度とバックグラウンドの比である S/B 値 (Signal / Background) が小さくなり、微量成分の検出が難しくなることが示されている (図 3.3.1-4 参照)。

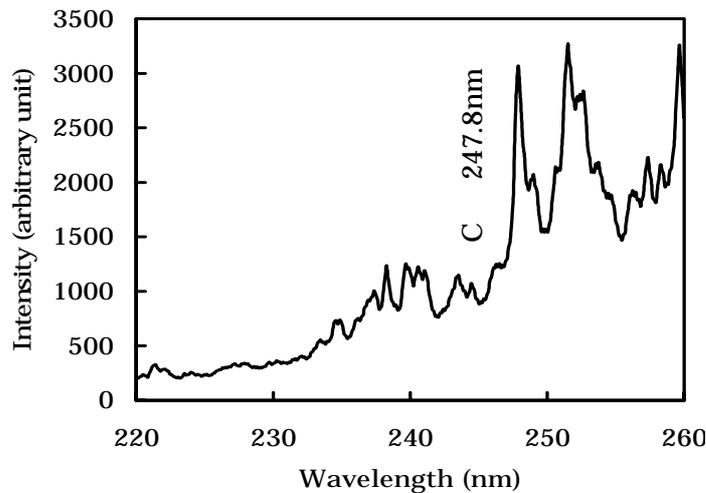


図 3.3.1-4 YAG レーザーによるコンクリート中炭素の分析結果

一方の TEACO₂ レーザーを用いた場合では、バックグラウンドの連続スペクトルが低く抑えられており、良好な S/B 値が得られることが分かる (図 3.3.1-5 参照)。

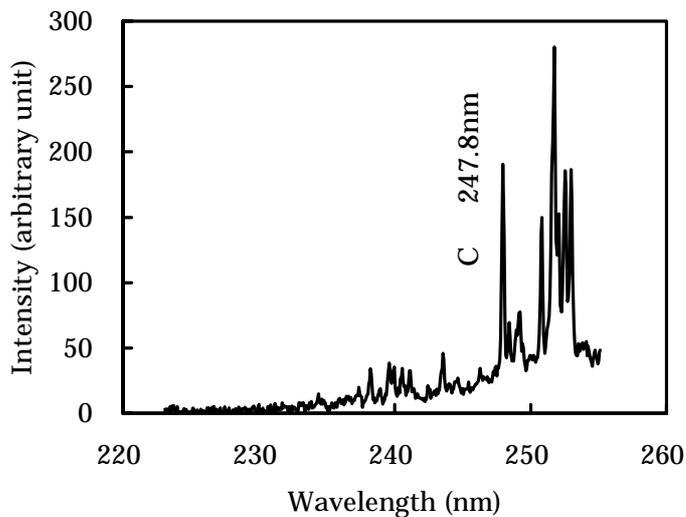


図 3.3.1-5 TEACO₂ レーザーによるコンクリート中炭素の分析結果

上記の比較分析結果は、コンクリートというセメント硬化体や砂などからなる無機複合材料の分析において、YAG レーザーよりも TEACO₂ レーザーの使用が有利であることを示しており、珪素を主成分とする砂やカルシウムを主成分とする粘土から構成される土壌の分析についても、同様の結果が得られる可能性があると推測できる。

土壌の分析技術を確立する上で、検討すべきパラメータとして、レーザー光の波長、エネルギー密度といった可変の条件、また対象物質の土質や硬さ、光吸収率などの与条件がある。

物質の光吸収率は照射光の波長に依存するが、土壌やコンクリートを対象とする場合、YAG レーザーの波長では TEACO₂ レーザーの波長より光吸収率が小さい。このため、YAG レーザーで十分なプラズマを発生させるには TEACO₂ レーザーより大きなエネルギーが必要となる。しかし、波長が短くパルス幅の短い YAG レーザーは、元々エネルギー密度が高いため、TEACO₂ レーザーより格段に強いエネルギーで照射することになり、不要なノイズ成分の増大を招くと考えられる。

土壌の分析に適したレーザープラズマ発生技術を確認するためには、上述のパラメータをモデル化する模擬汚染土壌試料を製作し、分析感度に与える影響を実験的に調べるのが重要である。

本実験で使用した実験装置について、以下に述べる。

図 3.3.1-6 に、レーザー誘起プラズマの発光を観測するための装置の模式図を示す。

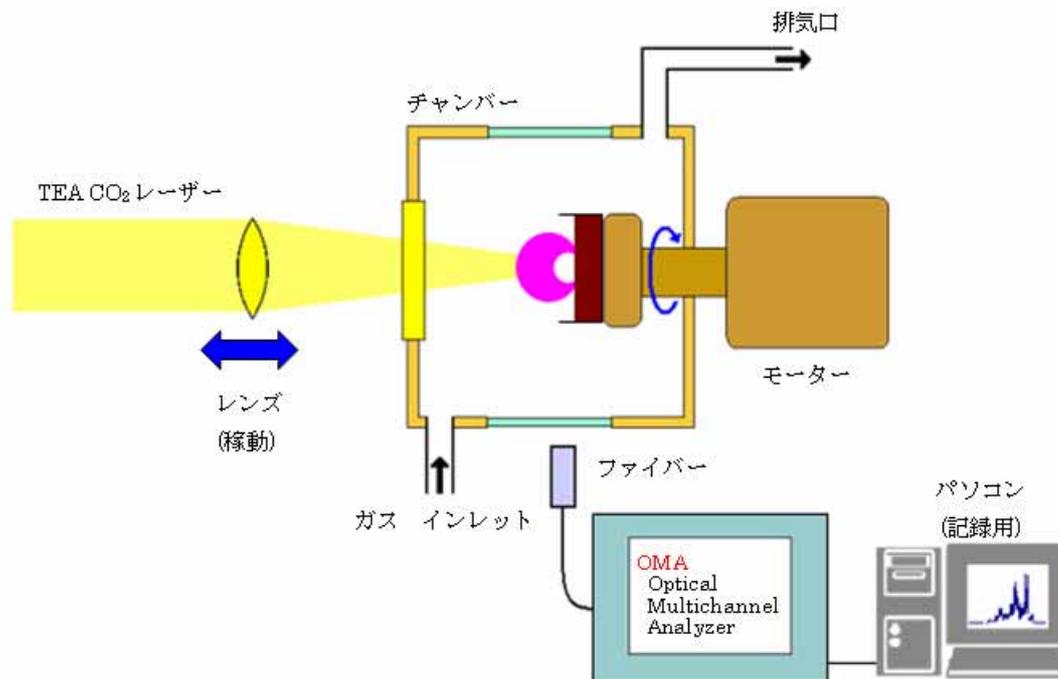


図 3.3.1-6 レーザープラズマ分光実験の装置概要

TEA CO₂ レーザーは、各種工業品への刻印加工（マーキング）を目的に開発・生産されたレーザーを使用した。TEA CO₂ レーザーが発生したレーザー光は、ZnSe レンズ（焦点距離 100 mm）によって集光され、試料とレンズの距離を 100mm とした場合には、断面積 1mm × 1mm 程度で試料に照射される。

土壌試料は、真空にも対応可能な金属製チャンバー（概略寸法：12cm×10cm×10cm）の中に固定されている。チャンバーには gas inlet のバルブと gas outlet のバルブがついている。gas inlet 側は、ニードルバルブに、また gas outlet 側は排気管に接続されており、窒素やヘリウムといったガスを inlet 側からチャンバー内に供給する際に、ニードルバルブの開度を調整することによって、チャンバー内のガス圧を調整することができる。チャンバー上部には、ピラニ - ゲージ(真空計)につながれており、チャンバー内のガス圧を常時測定することができる。

チャンバー内部には、土壌試料を取り付けるホルダー部があり、ホルダー部に直結したモーターを動かすことにより、土壌試料を回転させることができる。これにより、チャンバー内の環境を変えることなく、土壌試料の照射位置を変えることができる。

土壌試料にレーザー光を集光すると発生するプラズマ発光は、チャンバー側面の窓付近に設置した光ファイバーを通して分光装置に導いた。

分光装置には OMA(Optical Multi-channel Analyzer)を用いた。OMA は、フォトダイオードアレイ及びモノクロメーターなどを備えた分光器部と、それを制御するソフトをインストールしたパーソナルコンピュータで構成される。

受光部分である光ファイバーをプラズマの方向に固定し、パーソナルコンピュータを用いて測定するスペクトルの波長とフォトダイオードアレイの露光時間を設定すると、プラズマ全体の光を空間的に積分して短時間で発光スペクトルが画面に表示される。

スペクトルは、横軸に波長 nm、縦軸に発光強度（相対値）という 2 次元で表示され、各種発光線の波長や発光強度を読み取ったり、スペクトルの一部を拡大して表示することも可能である。

露光中の CCD 検出器の電氣的ノイズや熱によるランダムノイズからなるバックグラウンドノイズをプラズマ光の検出に先立って測定しておき、求めたい発光スペクトルからソフト上でノイズ成分を除去することが可能である。また、得られた分光スペクトルは、汎用の表計算ソフトで読み込み可能なファイル形式で保存することもできる。

チャンバー部と分光器部の写真を以下に示す。



図 3.3.1-7 チャンバー部の外観



図 3.3.1-8 分光器の外観

3.3.2 基礎実験の条件検討

前述のように、土壌の分析に適したレーザープラズマ分光分析技術を確立するためには、各種の土壌性状を模擬した汚染土壌試料を製作し、それらにレーザープラズマ分光分析法を適用して、実測データに基づいて土壌性状等が検出感度に与える影響を検討する必要がある。

ここでは、土壌中の重金属分析に適したレーザープラズマ分光分析技術を開発するために実施した基礎実験の計画について述べる。

土壌のレーザープラズマ分光分析実験において、考慮すべきパラメータとしては、下記が挙げられる（図 3.3.2-1 参照）。

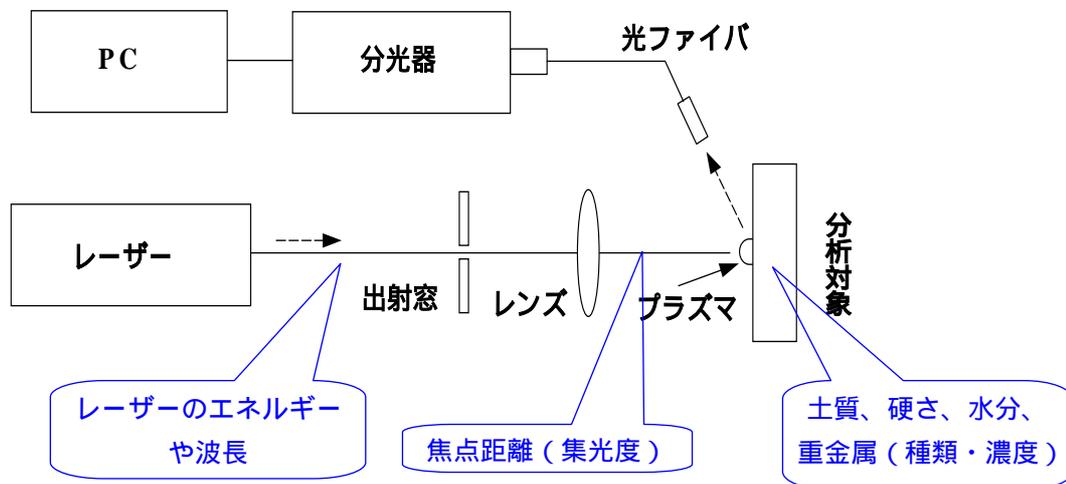


図 3.3.2-1 レーザープラズマ分光分析法における技術的検討課題

A. 土壌分析に適した仕様の検討

A-1 レーザーの波長とエネルギー密度（エネルギーと集光度）

B. 測定対象の環境など条件となるパラメータ

B-1 測定対象の重金属種類や濃度

B-2 土質（砂質、粘土質）

B-3 土壌の水分含有量

B-4 土壌の締固め度

以下順に、これらの実験パラメータの設定に際して検討した内容について述べる。

A-1 レーザーの波長とエネルギー密度（エネルギーと集光度）

3.3.1 で述べたように、レーザープラズマ分光分析法には、大別して YAG レーザー（波長：1064nm）を用いた LIBS 方と、TEACO₂ レーザー（波長：10600nm）を用いた LISPS 方がある。このうち、コンクリートの中酸化検査を目的とした実験により、TEACO₂ レーザーを用いた方がバックグラウンド光を抑えた、良好な計測ができることを確認している。土壌もコンクリートと同様に Ca や Si を主成分として含む不均質材料であり、同様の傾向があるものと想定されるが、その確認のために、代表的なケースのみについて、YAG レーザーと TEACO₂ レーザーによる分析性能の比較を行うこととする。

また、エネルギーと集光度、すなわちエネルギー密度については、従来のレーザー分光分析に関する研究事例、特に YAG レーザーを用いた LIBS 法の適用事例では、測定対象に含まれる微量元素の発光を強めるため、単にレーザー光の照射エネルギー密度を増大するといった操作が行われたりもしたが、エネルギー密度を過大に増加させることは、バックグラウンド光の増大をまねき、結果として検出感度の向上につながらないことが多い。

本実験では、重金属汚染土壌へのレーザー照射によって発生するプラズマ光の分光スペクトルにおいて、測定対象となる重金属の発光強度と、バックグラウンド光の発光強度の比を高めるようなエネルギー密度範囲について検討する。

B-1 測定対象の重金属種類

重金属汚染の実態調査資料から、汚染発覚事例数の多い重金属元素は、鉛、クロム、水銀、ヒ素であり、これら上位 4 元素で重金属汚染全体の 80%以上を占める。これらの元素の測定ニーズが高いことは、前述のとおりである。

土壌分析に適したレーザープラズマ分光分析法の開発において、最も重要な課題は、土壌という不均質な材料に適したプラズマ生成技術の確立である。土壌に含まれる重金属類の発光を強め、かつ不要なバックグラウンド光の発光を抑えるようなレーザープラズマ生成技術が重要となる。

すなわち、元素の種類により検出感度が異なる可能性はあるが、土壌の分析に適したプラズマの生成技術を確立することが、より本質的な課題である。

このような理由から、本実験では重金属元素の種類を固定して、はじめにレーザープラズマ生成技術の検討を行った。模擬汚染土壌試料製作に伴う取扱い時や実験時の安全性を考慮して、銅を重金属元素の代表として用いることとした。

銅を用いたレーザープラズマ生成技術の検討実験の後、鉛とクロムについて、検出感度と検量線の作成を試みることにした。

本調査研究に基づく汚染調査機械システムが、将来的に検出対象とすべき元素として、他に水銀とヒ素があるが、これらの検出実験は以下の理由により、限られた調査研究期間中の実施は困難であった。

- ・ ヒ素の発光線のうち、最も強いもの（193nm）は極めて波長の短い紫外光であり、いわゆる真空紫外領域に属する（大気中では減衰が大きいため、測定を行うには真空が必要となることからこう呼ばれる）。このような波長領域に属する光は、光ファイバ中での伝送損失が大きいため、光ファイバを導光路として使用する通常の分光分析システムでは、信号の

減衰が著しく測定が困難である。

地中に貫入させたプローブ部から、ヒ素の発光を地上の分光器に導き、分析を行うためには、特別の導光技術が必要となる。将来的には、中空ファイバなどの開発動向を注視しながら、極めて波長の短い紫外光を低損失で伝送できる導光技術を活用することが、このような課題の克服につながると考えられる。本研究では、レーザープラズマ分光分析法の土壤汚染計測への適用性を評価することを第一の目的とするため、新しい動向技術の開発までは研究対象としなかった。

- ・水銀を含む土壤試料に高強度のレーザー光を照射すると、土壤試料は瞬時に高温となり、重金属類の中で特に沸点の低い水銀は、蒸気となって分析装置周辺に拡散することが予想される。水銀蒸気は、神経毒性などを有する極めて危険な猛毒物質であり、実験パラメータの影響を繰り返し検討する実験を通じて、実験者や第三者が水銀蒸気を吸引しないよう、専用の換気装置などの安全対策を講じる必要がある。

レーザープラズマ分光分析法の検出性能は、元素の種類よりも土壤の性状による影響を受けやすいため、レーザープラズマ分光分析法の適用可能性を検討するという本調査研究の目的に鑑みて、敢えて危険な毒性物質による実験を行うことの意義は小さいと言える。

以上の理由により、本調査研究では、ヒ素と水銀に励起エネルギーが比較的近い値の亜鉛と銅を代替物質として選定し、基礎実験を行った。

なお、励起エネルギーとは、原子の発光に必要な高いエネルギー状態にするために必要なエネルギーのことであり、励起エネルギーの違いによって、レーザー照射による発光の効率が異なると考えられる。

前述したように、レーザープラズマ分光分析法の適用可能性を検討する上で、元素の種類よりも土壤性状の方が検出性能に与える影響が大きいことから、本実験では、はじめに銅を用いたレーザープラズマ生成技術の検討実験を行い、その後、実際に汚染事例数の多い鉛やクロム、亜鉛を含む模擬試料を用いて、重金属類の検出可能性を検討することとした。

なお、将来的には、水銀蒸気が発生してもこれを安全に除去回収する設備を使用して、水銀の検出実験を行うことも必要と考える。

B-2 土質（砂質、粘土質）

例えば、土壤を構成する粒子の大きさ（粒度分布）によって、地盤の硬さが異なるように、より小さい土壤の集合体についても、粒度分布によりその硬さが異なると考えられる。このため、砂質あるいは粘土質といった土質によって、レーザープラズマ分光法の重金属検出感度は影響を受けると予想される。

土壤が硬い場合には、レーザー光を照射した際に発生する衝撃波の速度は大きくなり、プラズマの励起効率は高くなると考えられるが、土壤が軟らかい場合には、衝撃波速度が小さくなり、あるいは十分な衝撃波が発生しないため、プラズマ発光が弱くなると予想される。

従って、模擬汚染土壤試料を用いた実験では、土質の影響を検討するために、砂質土や粘性土といった性状の異なる土壤試料に重金属を混入させて、検出感度を調べる必要があると考えられる。

B-3 土壌の水分含有量

前述のように、土質はレーザープラズマ分光法の検出感度に影響を与えると考えられるが、土壌水分含有量についても、分析への影響を検討することが重要である。

本調査研究で取り上げるレーザー光源は、波長 10.6 μm の炭酸ガスパルスレーザーである。この波長は、水によく吸収されるため、高含水率の土壌にレーザー光を照射すると、水にレーザー光が吸収されて、重金属を含む土壌のプラズマ発光の強さが影響を受ける可能性もある。

また、土壌は水を含むと硬さが変化することから、水分含有量変化による硬さの変化が、衝撃波の伝搬速度に影響を与え、結果としてプラズマ発光の強さに影響を与える可能性もある。

従って、模擬汚染土壌試料による基礎実験では、土壌の水分含有量と検出感度の関係について検討する必要がある。

B-4 土壌の締固め度

B-2、B-3 で述べたように、土壌の硬さは、レーザー照射時に発生するプラズマ発光の強さに影響を与える。土壌の構成材料は同じであっても、締め固めの度合いが異なれば、当然硬さが異なるため、土壌の硬さを考える場合、砂や粘土といった土質による硬さだけでなく、締固め度についても考慮する必要がある。

YAG レーザーを用いた LIBS 法の適用事例では、土壌試料に数トン規模の大荷重をかけて、加圧成型し、検出感を向上させている報告が見られる。このことは、土壌試料の分析に土壌の締固め度が影響を与えることを示している。

ただし、本調査研究では、オンサイトで迅速な調査を行うための機械システムの開発を目標としているため、数トン規模といった過大な荷重による成型を必要とせず、通常のコーン貫入程度、あるいは理想的には人力による貫入程度の荷重で成型された土壌試料の分析が可能になることが望ましい。

模擬汚染土壌試料を用いた基礎実験では、人力で加圧成型した土壌試料を分析に供することとし、特に機械式の成型器具は用いないこととした。

3.3.3 模擬汚染土壌試料の製作

土壌の分析に適したレーザープラズマ分光分析技術を開発するためには、土壌という複雑で不均質な材料が有するパラメータが、レーザープラズマ生成に与える影響を考慮する必要がある。

前述のとおり、模擬汚染土壌試料を用いた実験で検討すべきパラメータには、機械システムの研究開発過程で仕様の最適化を検討するパラメータと、測定対象の環境など条件となるパラメータがある。このうち、模擬汚染土壌試料の製作に関係するものは后者であり、その内容は下記のとおりである。

測定対象の重金属種類
土質（砂質や粘土質など）
土壌の水分含有量
土壌の締固め度

実際の土壌性状は、場所により無数の差異や変化を有するが、レーザープラズマ分光分析法に与える影響を評価する場合、実験モデルとして考慮すべきパラメータは、上記に絞ることができる。言い換えれば、複雑で多様な性状を有する実際の汚染土壌を用いるよりも、性状を単純化した模擬汚染土壌により評価を行うことが有効である。

模擬汚染土壌の製作に際しては、実験の妥当性や再現性、及び安全性を考慮して、上記項目の選定を行った。

検討内容の詳細を以下、順に示す。

実験で使用する重金属

実験で使用する重金属は、3.3.2 基礎実験の条件検討で述べた理由に基づき、鉛、クロム、銅、亜鉛とした。

これらの重金属元素を一定量含む模擬汚染土壌試料の製作に際しては、以下の点を考慮した。

a．重金属は土壌中にできる限り均一に分散して存在すること

実験の再現性を確保するために、土壌試料中には重金属が均一に含まれる必要がある。

本実験で製作する試料の濃度は、最小で数十 mg/kg というような小さな値である。これは例えば、1kg という土壌に対して数十 mg という微量の重金属を混合することを意味する。数十 mg の重金属試薬を粉体のままで 1kg の土壌に混入しても、混合時に最初に触れた場所に重金属が吸着されて、均一に混合することは難しくなることが予想される。

このため、本実験では、粉体状の重金属試薬を一旦溶媒に溶かした上で、混合・攪拌することとした。

b．重金属を土壌試料に混入させる際に土壌の性状が変質しないこと

重金属試薬の溶媒に酸やアルカリ、有機溶剤を使うと、溶媒により土壌が変質することや、本来の実験にとっては不要な不純物が混入することによる計測への影響が懸念される。

このため、重金属試薬の溶媒として水（精製水）を使用した。

また、試薬の溶液を作る際に用いる溶媒の量は、砂質土や粘性土の含水量に関する試験を予め実施し、土壌試料が湿潤状態となる量と同じになることを目標とした（ここで言う湿潤状態とは、試料の表面にまで水分が付着している状態を指す）。

湿潤状態とするのに必要な水の量は、実験に用いた珪砂の場合、数%程度であったため、試薬の溶解に用いることのできる溶媒の量には上限があった。

このため、試薬（重金属化合物）の選定に際しては、水に対する溶解度が大きいものを検討した。水に対する溶解度が大きい化合物を選定することによって、濃度の高い土壌試料を製作する際に、多量の水溶液が土壌試料に吸収されず、土壌と重金属溶液が分離するといった状態を防ぐことができる。

c. 基礎実験では代替可能な猛毒物質はなるべく使用しないこと

水銀 Hg、ヒ素 As については、神経毒性が強い物質であり、アブレーションにより蒸散・気化した状態（ナノメートルオーダーの超微粒子も含まれる）を完全に濾過することが、技術的に困難であるため、他の物質でプラズマ発光に関する基礎的な検討を行うことが妥当である。

本調査研究では、水銀 Hg やヒ素 As については、励起エネルギー（ ）が比較的近い銅 Cu や亜鉛 Zn を代替物質として試験を行い、プラズマ生成技術を確立する上で最も重要な土壌の性状等による分析への影響に関する知見を得ることとした。

（ ）励起エネルギー：原子の発光に必要な高いエネルギー状態にするために必要なエネルギーのこと。

なお、参考として、4 種類の重金属の気中における許容濃度は下記のとおりである。

Pb: 0.1 mg/m³、Cr: 0.05 mg/m³、Hg: 0.025 mg/m³、As: 0.01 mg/m³

これらの値は、1 日 8 時間、週 40 時間労働で暴露されても、問題ない濃度レベル（日本産業衛生学会）を示している。これらのうち、Hg と As の許容濃度は極めて低く、十分な安全対策によって、実験実施場所を含む建物内やその周辺に汚染物質を拡散させないことが必要である。

以上の事項を考慮して、各種文献資料から水に対する溶解度が大きい重金属化合物を調査し、均一分散・混合に適した鉛、クロム、亜鉛の化合物を下記のとおり選定した。

鉛化合物： 酢酸鉛三水和物 (CH₃COO)₂Pb・3H₂O

クロム化合物： 硝酸クロム()九水和物 Cr(NO₃)₃・9H₂O

亜鉛化合物： 硫酸亜鉛七水和物 ZnSO₄・7H₂O

なお、レーザープラズマ分光法においては、元素の存在形態による検出感度への影響は比較的小さいと考えられる。他の混合方法を用いることにより、模擬試料中で重金属元素が偏在すれば、試験の正確性・再現性を確保できなく、より大きな問題を生じると考えた。

土質

本調査研究における実験では、砂質土、粘性土を代表する土壌試料として、それぞれ珪砂、関東ロームを使用した。詳細は、下記のとおりである。

珪砂（砂質土）:

4号珪砂（中心粒径 850 μ m 程度） 5号珪砂（中心粒径 450 μ m 程度）

成分の目安：SiO₂: 90%以上、Al₂O₃: 2%、Fe₂O₃: 1%、ほか MgO、CaO 等

関東ローム（粘性土）:

JIS 試験用粉体（第7種）及び、都内の工事現場より採取した土

JIS 試験用粉体の成分の目安：SiO₂: 35%、Al₂O₃: 30%、Fe₂O₃: 20%、ほか MgO、CaO 等

中心粒径：20～40 μ m

都内工事現場から採取した土：粒径 5 μ m 以下の粘土分を 60%以上含む

模擬試料の濃度

模擬試料の濃度は6種類とし、土壌汚染対策法で定められた土壌含有量基準が中間的な値になるように最大、最小濃度を設定した。

試料の濃度（汚染物質の重量/土壌の絶乾重量：mg/kg）

	基準値	試料	試料	試料	試料	試料	試料
Pb	150	15	30	150	750	1,500	4,500
Cr	250	25	50	250	1,250	2,500	5,000

基準値は、土壌汚染対策法で規定された土壌含有量基準（mg/kg）を指す。

なお、Asの代替物質であるZnについては、Asの土壌含有量基準を準用した。

実験の安全性

レーザー照射により、重金属を含む土壌試料はアブレーション（蒸散・気化）を起こすため、ガス化した重金属を実験者が吸引する危険性がある。

アブレーションにより蒸散される粒子の大きさは、小さいものでは、数～数十 nm（ナノメートル、10⁻⁹m）と非常に小さく、現在クリーンルームなどで用いられている高性能な集塵機に使用される HEPA フィルタで捕捉可能な粒子径（数百 nm）よりもはるかに小さい。このため、HEPA フィルタ等を搭載した実用的な微粉じん除去装置では、吸入を完全に防止することは難しい。

特に水銀蒸気は、神経毒性を有するなど極めて深刻な健康影響をもたらす可能性があるため、元素の種類よりも土壌の性状等の影響を検討することが目的の本実験では、より安全な代替物質を用いることが妥当である。

その他の課題として、ヒ素 As の発光線は 200nm 未満にあるため、導光路中での減衰が大きく、通常の光ファイバ導光路が使えない。特殊な分光器の使用も検討する必要がある。この対策については、特別な機構も必要となるため、今後の検討課題とする。

以上のことを考慮して、模擬汚染土壌を製作した。材料の調合表を以下に示す。

鉛（砂質土、粘性土）

濃度 (mg/kg)	土壌絶乾重量 (g)	酢酸鉛重量 (mg)	最小必要水量 (mg、20)	合計重量 (g)
15	1000.000	27.47	62.01	1000.089
30	1000.000	54.95	124.03	1000.179
150	1000.000	274.73	620.15	1000.895
750	1000.000	1373.63	3100.74	1004.474
1500	1000.000	2747.25	6201.47	1008.949
4500	1000.000	8241.76	18604.42	1026.846

$(\text{CH}_3\text{COO})_2\text{Pb} \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ 中の Pb 重量 $207.21 / (207.21 + 12 \cdot 4 + 1 \cdot 12 + 16 \cdot 7) = 54.6\%$

「酢酸鉛重量 mg」 = 「濃度 mg/kg」 / 0.546

20 の水に対する溶解度 44.3% （全量を溶かしきるのに必要な水量）

「水重量 mg」 = 「酢酸鉛重量 mg」 / 0.443

「合計重量 g」 = 「土壌絶乾重量 g」 + 「酢酸鉛重量 mg」 + 「水重量 mg」

クロム（砂質土、粘性土）

濃度 (mg/kg)	土壌絶乾重量 (g)	硝酸クロム重量 (mg)	最小必要水量 (mg、30)	合計重量 (g)
25	1000.000	192.31	404.86	1000.597
50	1000.000	384.62	809.73	1001.194
250	1000.000	1923.08	4048.59	1005.972
1250	1000.000	9615.38	20242.91	1029.858
2500	1000.000	19230.77	40485.83	1059.717
5000	1000.000	38461.54	80971.66	1119.433

硝酸クロム()九水和物 $\text{Cr}(\text{NO}_3)_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$ 中のクロム Cr 重量

$52 / (52 + (14 + 16 \cdot 3) \cdot 3 + 9 \cdot 18) = 13.0\%$

「硝酸クロム重量 mg」 = 「濃度 mg/kg」 / 0.13

30 の水に対する溶解度 47.5% （全量を溶かしきるのに必要な水量）

「水重量 mg」 = 「硝酸クロム重量 mg」 / 0.475

「合計重量 g」 = 「土壌絶乾重量 g」 + 「硝酸クロム重量 mg」 + 「水重量 mg」

亜鉛（砂質土、粘性土）

濃度 (mg/kg)	土壌絶乾重量 (g)	硫酸亜鉛重量 (mg)	最小必要水量 (mg、20)	合計重量 (g)	気乾重量 (g)
15	1000.000	65.93	122.10	1000.188	
30	1000.000	131.87	244.20	1000.376	
150	1000.000	659.34	1221.00	1001.880	
750	1000.000	3296.70	6105.01	1009.402	
1500	1000.000	6593.41	12210.01	1018.803	
4500	1000.000	19780.22	36630.04	1056.410	

ZnSO₄·7H₂O 中の Zn 重量 $65.39 / (65.39 + 32.07 + 16 \times 4 + 18 \times 7) = 22.75\%$

「硫酸亜鉛重量 mg」 = 「濃度 mg/kg」 / 0.2275

20 の水に対する溶解度 54% （全量を溶かしきるのに必要な水量）

「水重量 mg」 = 「硫酸亜鉛重量 mg」 / 0.54

「合計重量 g」 = 「土壌絶乾重量 g」 + 「硫酸亜鉛重量 mg」 + 「水重量 mg」

本実験では、500g 程度の模擬汚染土壌試料を前述の方法で製作したが、レーザープラズマ分光実験に際して、水分含有量や締固め度を管理する上で、実験に用いる土壌試料を一定量とする必要があるため、また 3.3.1 で述べたチャンパー内に試料を設置するために、土壌試料はプラスチックシャーレ（内寸 35mm 程度、高さ 10mm 程度）に納めて、実験に供した。

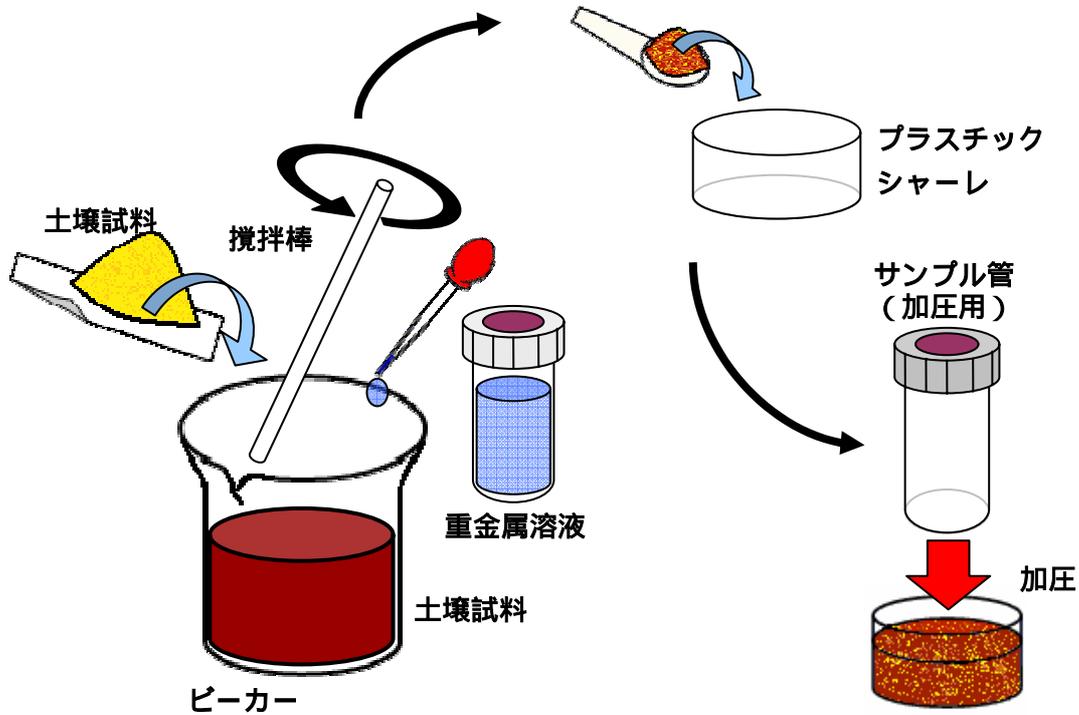


図 3.3.3-1 模擬汚染土壌試料の成型方法

所定の濃度に調整された模擬汚染土壌試料は、プラスチックシャーレに移された後、加圧成型され、チャンパー内のホルダーに取り付けた。

土壌試料の成型時の加圧は、加圧機械等を使わず人力により行った。図 3.3.3-1 に示すように、模擬汚染土壌試料をプラスチックシャーレに移し、その上からガラス製サンプル管を押し当てて人力で加圧した。加圧時の荷重は、およそ 15~20kgf 程度であった。ガラス製サンプル管の寸法が、直径 35mm であったことから、土壌試料に加えられた圧力を概算で求めると、 $2\text{kgf}/\text{cm}^2$ 程度と考えられる。以下、特にことわらない限り、試料の加圧は $2\text{kgf}/\text{cm}^2$ 程度である。

なお、海外の研究機関による先駆的な研究事例での試料成型方法を紹介すると、イスラエルの研究グループが行った LIBS (Laser Induced Breakdown Spectroscopy) 法による土壌中の銅や垂鉛の検出実験では、 $900\text{kgf}/\text{cm}^2$ という強大な圧力で約 5 分間の加圧成型が行われ、さらに接着剤を添加して固化することにより、検出感度の向上が図られている⁴⁾。

製作した模擬汚染土壌試料の写真を以下に示す。



珪砂 5号



珪砂 4号



粘性土 (関東ローム)

図 3.3.3-2 模擬汚染土壌試料の製作で使用した土壌材料



図 3.3.3-3 プラスチックシャーレ内で成型した模擬汚染土壌試料
(左：珪砂 4号、右：珪砂 5号)



図 3.3.3-4 プラスチックシャーレ内で成型した模擬汚染土壌試料（粘性土）

3.3.4 レーザーの波長、エネルギー及び集光度の適正化に関する検討

前節で述べたように、レーザープラズマ分光分析法の基礎的な適用性を検討する上では、重金属種類よりも土壌性状による分析への影響を把握することが重要であるので、当初、重金属の種類については銅に絞って、模擬汚染土壌試料を用いた実験を行い、レーザーの波長（レーザーの種類）、エネルギー及び集光度について検討した。

本節では、その実験概要について説明する。

（１）レーザーの波長（レーザーの種類）

3.3.1 で述べたように、これまでのレーザープラズマ分光分析法で用いられてきたレーザーの種類は、主として YAG レーザー（Yttrium Aluminum Garnet Laser、波長：1064nm）であったが、本調査研究では TEACO₂ レーザー（Transversely Excited Atmospheric Pressure Laser、波長 10600nm）の性能に着目して、実験を行うこととした。

はじめに、これら 2 つのレーザーの適用性を判断することを目的とした比較実験を行った。

一般に材料による光の吸収しやすさは、光の波長により異なるが、TEA-CO₂ レーザーの光は、YAG レーザーの光に比べて、水や土壌成分に対する吸収率がよく、比較的低いエネルギー密度でもプラズマを発生しやすい。

一方、YAG レーザーの場合、光の吸収率が低いため、プラズマを発生させるためには、より強いエネルギーが必要となる。

また、YAG レーザーは TEA-CO₂ レーザーと比べて、レーザーパルス光の継続時間（パルス幅という）が 1/10 以下と短いため、光エネルギーのピーク強度が格段に大きいと言える。

このような特性の違いから、YAG レーザーを用いたプラズマ励起では、土壌の分析に適したレベルを大幅に上回るエネルギーのレーザー光が照射されることになり、プラズマ化に要するエネルギーしきい値が比較的高い砂などもプラズマ化してしまい、バックグラウンド光が増大して、測定の影響となる。

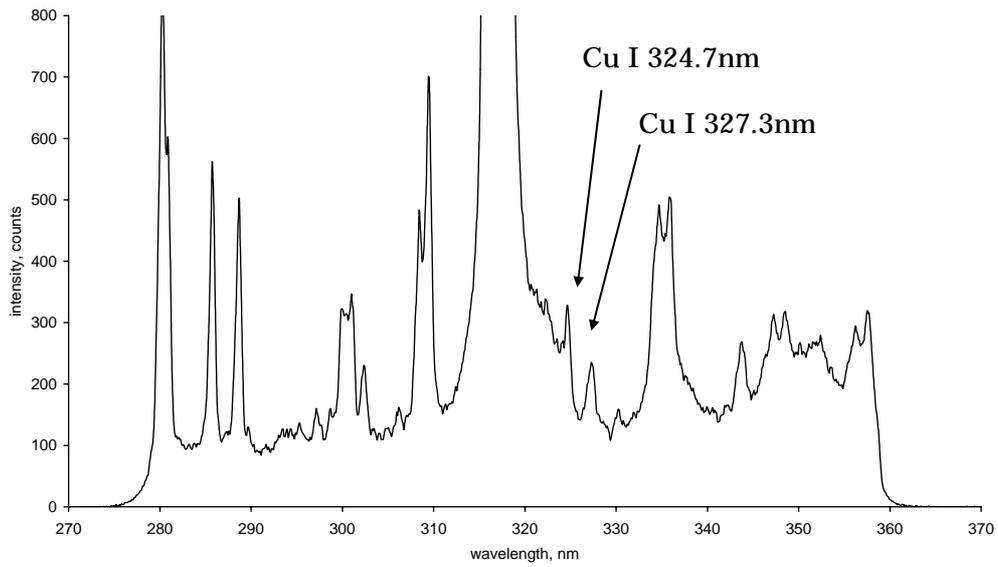


図 3.3.4-1 YAG レーザー（波長 1064nm）を用いた場合の発光スペクトル
砂質土中に一定量の Cu を含有する模擬汚染土壌試料

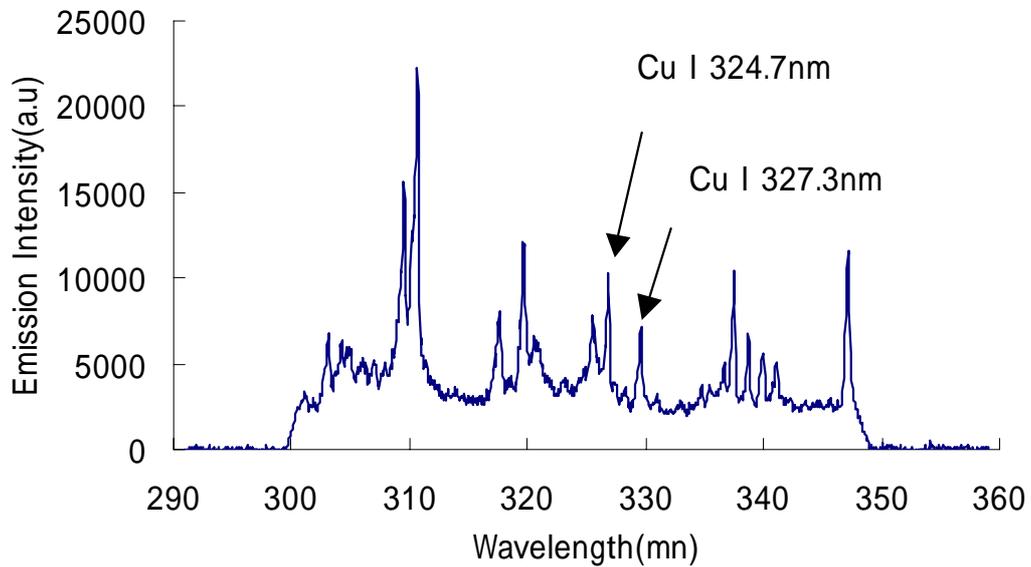


図 3.3.4-2 TEACO₂ レーザー（波長 10600nm）用いた場合の発光スペクトル
砂質土中に一定量の Cu を含有する模擬汚染土壌試料

図 3.3.4-1 に、砂質土中に一定量の銅を含む模擬汚染土壌試料に対して、YAG レーザーを照射した際の発光スペクトルの分光分析結果を示す。

また図 3.3.4-2 に、砂質土中に上記と同じ量の銅を含む模擬汚染土壌試料に対して、TEACO₂ レーザーを照射した際の発光スペクトルの分光分析結果を示す。

なお、これらの図の横軸は光の波長を表し、縦軸は当該波長の光の強さを相対値で表したものである。

両者を比較すると、YAG レーザーを用いた場合の方が、信号成分（この場合 Cu の発光線である 324.7nm と 327.3nm のピーク強度）とバックグラウンド光（周辺のノイズレベル）の比が小さいため、YAG レーザーでは微量成分の検出が難しいと言える。

同様の結果は、コンクリート中性化の検査を目的として実施した、炭素検出実験（3.3.1 参照）でも得られている。土壌やコンクリートは、どちらも Ca や Siなどを主成分とする不均質材料であり、こうした材料の分析に TEA-CO₂ レーザーが適していることが分かった。

（2）レーザーエネルギー

集光レンズを用いて数 mm 角程度の範囲にレーザー光を集光する場合、プラズマ発生のおしい値は、土質にもよるが数百 mJ 程度が必要であることが分かった。

また、レーザーエネルギーを変化させて、プラズマ発光のスペクトルを観測し、良好な S/B（信号成分である重金属の発光線の強さ / バックグラウンドの発光の強さ）が得られるエネルギーの範囲を把握した（図 3.3.4-3 参照）。

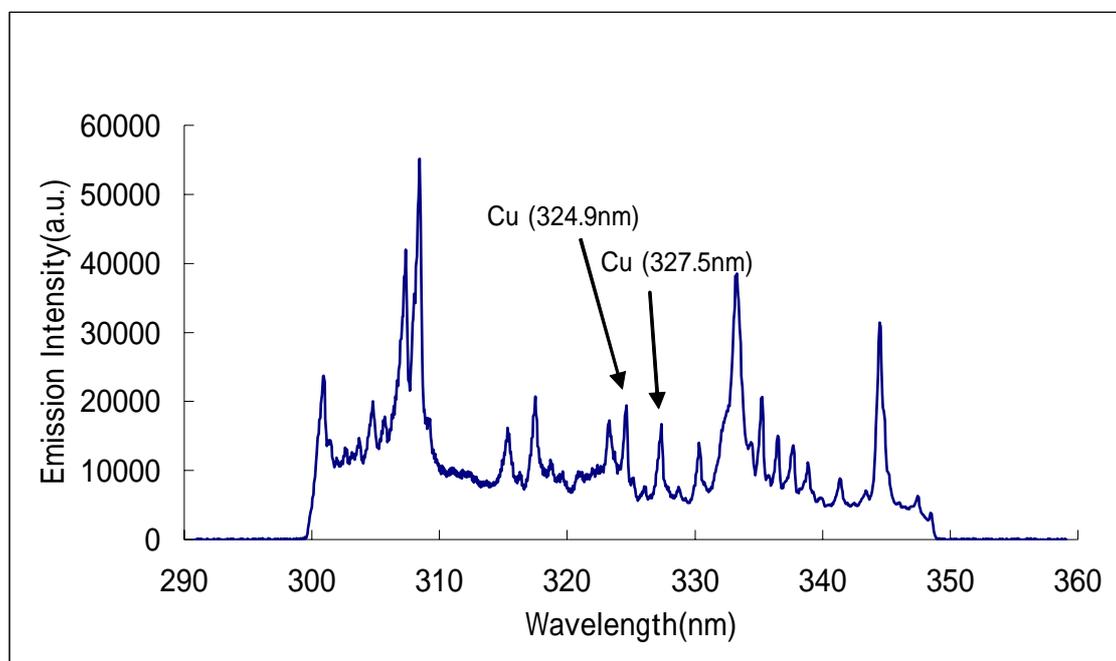


図 3.3.4-3 レーザーエネルギー適正時の発光スペクトル

さらに、レーザーエネルギーを大きくしていくと、次第にバックグラウンド光が強くなり、銅の発光線が相対的に見えにくくなる（図 3.3.4-4 参照）。

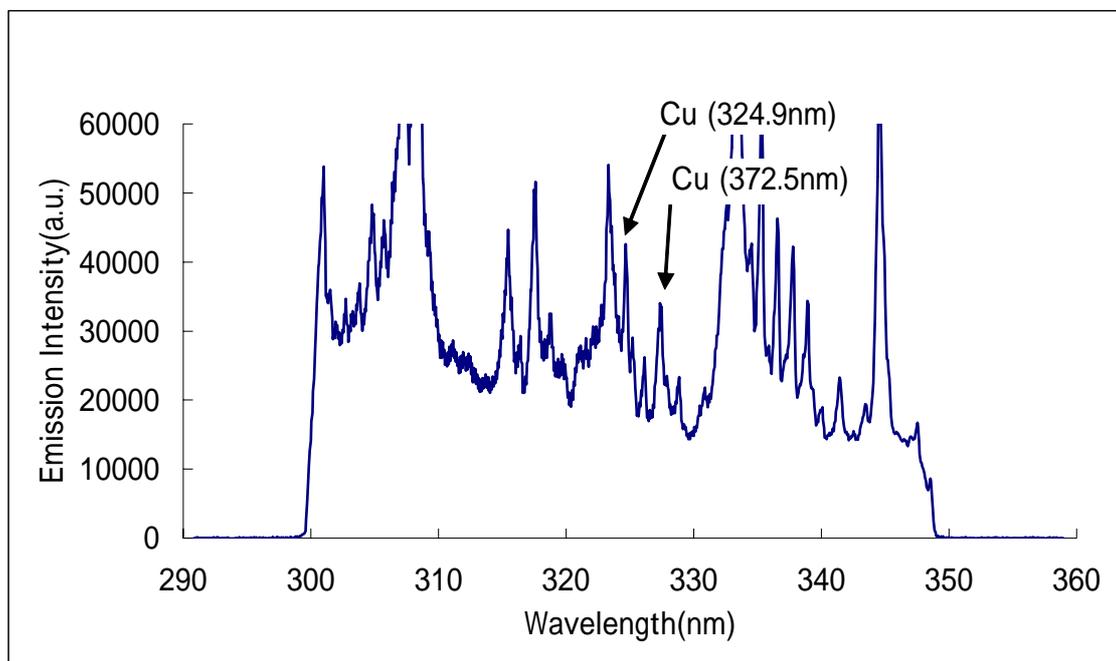


図 3.3.4-4 レーザーエネルギーが適正範囲の上限である場合

以上のような検討を繰り返し、分光分析を行うために適したレーザーエネルギーの範囲を把握した。

(3) 集光度

分析対象物の表面に到達するレーザー光のエネルギー密度を変化させる方法として、集光レンズと測定対象物との距離を変化させる方法がある。

集光レンズは、固有の焦点距離をもっており、集光レンズと測定対象物との距離が焦点距離に等しい場合、集光度が最大となり、対象物表面に照射されるレーザー光のエネルギー密度は最大となる。

3.3.1 で述べたように、レーザープラズマの発光は、レーザー照射によって噴出する原子が作り出す衝撃波に起因している。レーザー光の照射エネルギー密度は、噴出する原子のエネルギーや衝撃波の速度と相関をもつと考えられる。すなわち、過大なエネルギー密度で衝撃波を発生させると、測定に不要なバックグラウンド成分の増大を招き、微量成分の検出が困難になる可能性が高い。

こうした理由から、バックグラウンド光のレベルを下げて、測定すべき物質の発光線を感度良く検出するために、レーザーのデフォーカス（集光レンズの焦点を外した照射）が必要となる。

レーザーの集光度を最大（タイトフォーカスという）にした場合と、デフォーカスの場合とで、信号成分とノイズ成分の比を比較した。

本実験では、砂質土 80%に粘性土を 20%加えたものに、一定量の銅を混ぜて実験用模擬試料とした。

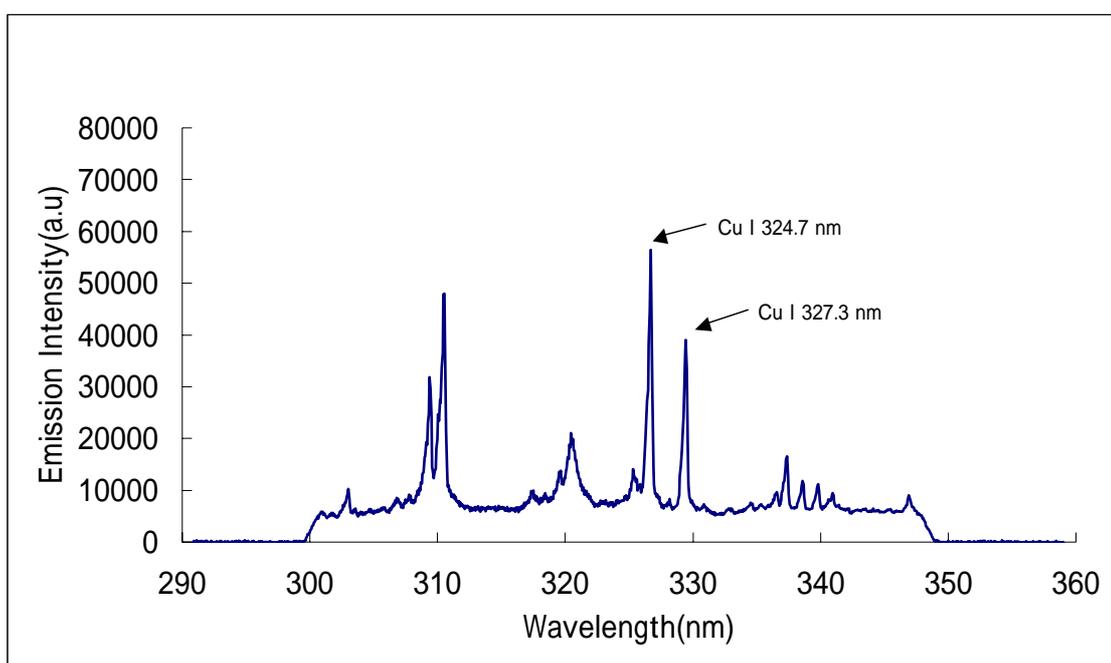


図 3.3.4-5 過大な集光度の場合（tight focus）の発光スペクトル

図 3.3.4-5 に、土壌試料と集光レンズの距離をレンズ固有の焦点距離に等しくした場合（tight focus）の発光スペクトルを示す。また図 3.3.4-6 には、レンズがもつ焦点距離よりも小さい距離でレーザー光を集光した場合（defocus）の発光スペクトルを示す。

両者を比較すると、デフォーカスとした場合の方が、信号成分とバックグラウンド成分の発光

強度の比 (S/B) が大きくなることが確認された。デフォーカスとすることにより、タイトフォーカス時に比べ S/B 値が 120%以上に改善した。

以上のことから、tight focus では集光度が過大となっているが、defocus とすることで、信号成分とバックグラウンド成分の発光強度の比 (S/B) を大きくすることが可能であることが分かった。微量の重金属成分を検出するためには、S/B 値ができるだけ大きくなるような照射条件で測定を行うことが望ましい。

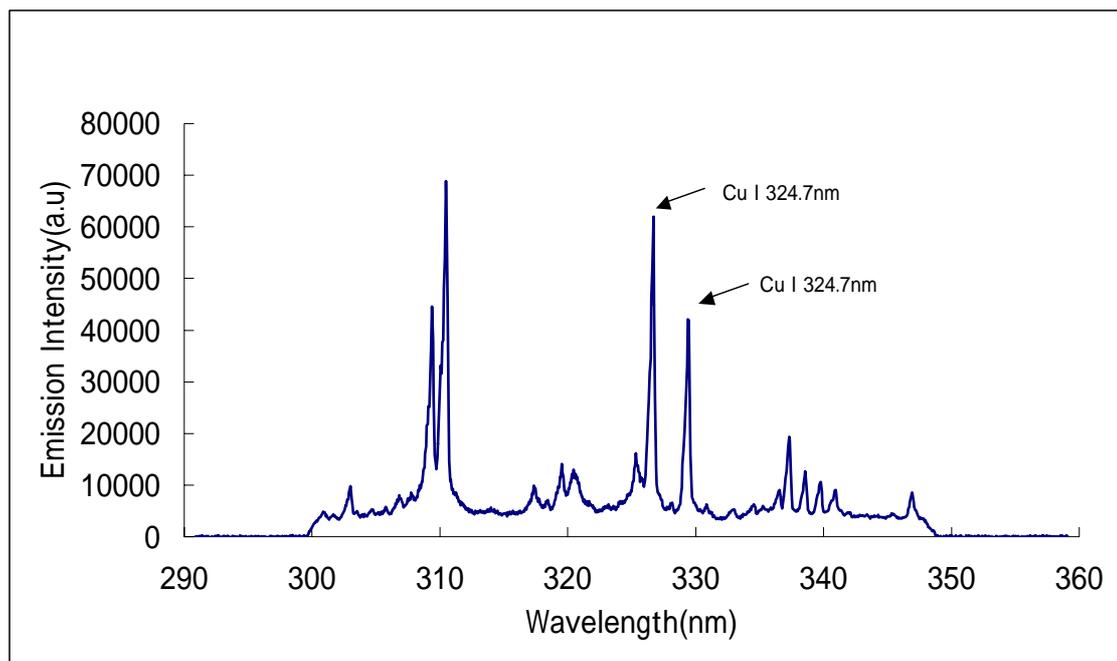


図 3.3.4-6 適正な集光度の場合 (defocus) の発光スペクトル

なお、図 3.3.4-6 の実験においては、デフォーカス距離を変化させて、信号成分とバックグラウンド光成分の強度比が最大となるデフォーカス距離を探索した。

3.3.5 プラズマ分光の補助的手段としての雰囲気ガスの影響

レーザー光を照射する試料表面の周囲に存在するガスを雰囲気ガスと呼ぶ。雰囲気ガスは、以下に述べる理由により、レーザープラズマ分光分析法の検出感度に影響を与える可能性がある。

本節では、その影響に関する実験的な検討について述べる。

プラズマ発光が生じる過程では、レーザー照射によって材料表面から吹き出した原子が、その周囲に存在するガスに向かって高速で飛んでいき、熱的に励起されることが、衝撃波モデルによって確かめられている。

さらに、レーザーの繰り返し照射時に、照射部に荷電粒子（プラズマ）が残留していると、後続のレーザー光をプラズマが遮ってしまい、照射対象物の表面に発生するプラズマのエネルギーが減少する。この現象を防ぐために、レーザー照射部にガスを十分吹き付けることも有効であると考えられる。なお、前記の現象はプラズマ遮蔽などと呼ばれる。

このような理由から、雰囲気ガスの種類や状態が、励起されるプラズマ発光に影響を及ぼす可能性があるため、雰囲気ガスの影響について実験的に検討した。

図 3.3.5-1～図 3.3.5-4 は、空気、ヘリウム、窒素、アルゴンの 4 種類の雰囲気ガスについて、一定量の銅 Cu のスペクトル検出を試みた結果である。ここで用いた土壌は粘性土である。

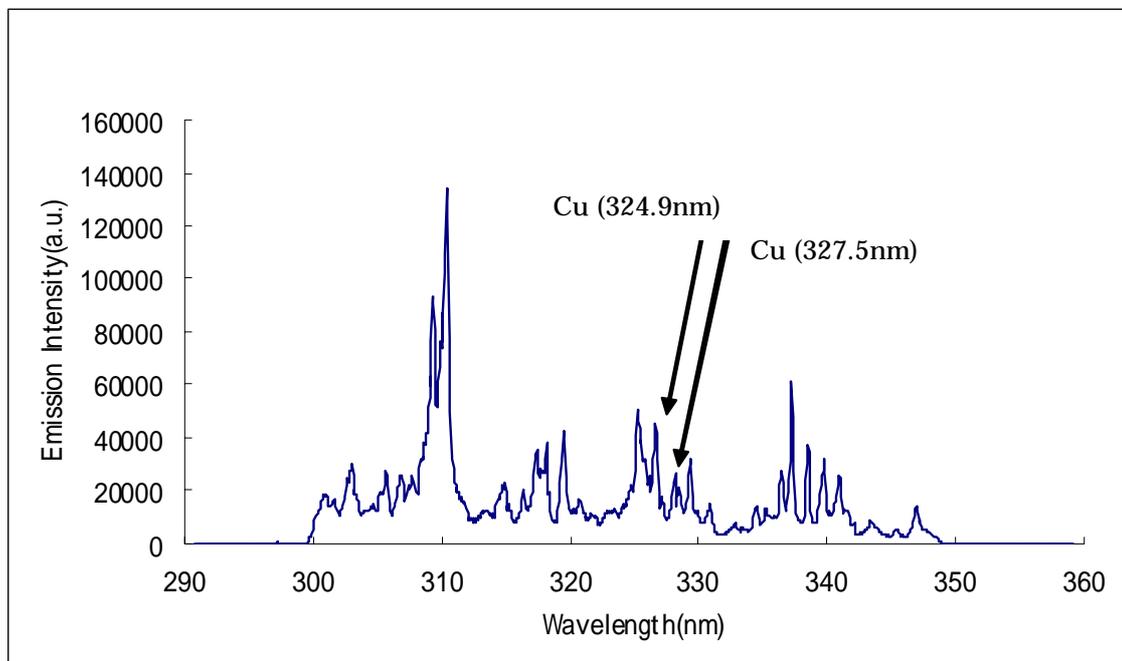


図 3.3.5-1 空気を雰囲気ガスとした場合の発光スペクトル

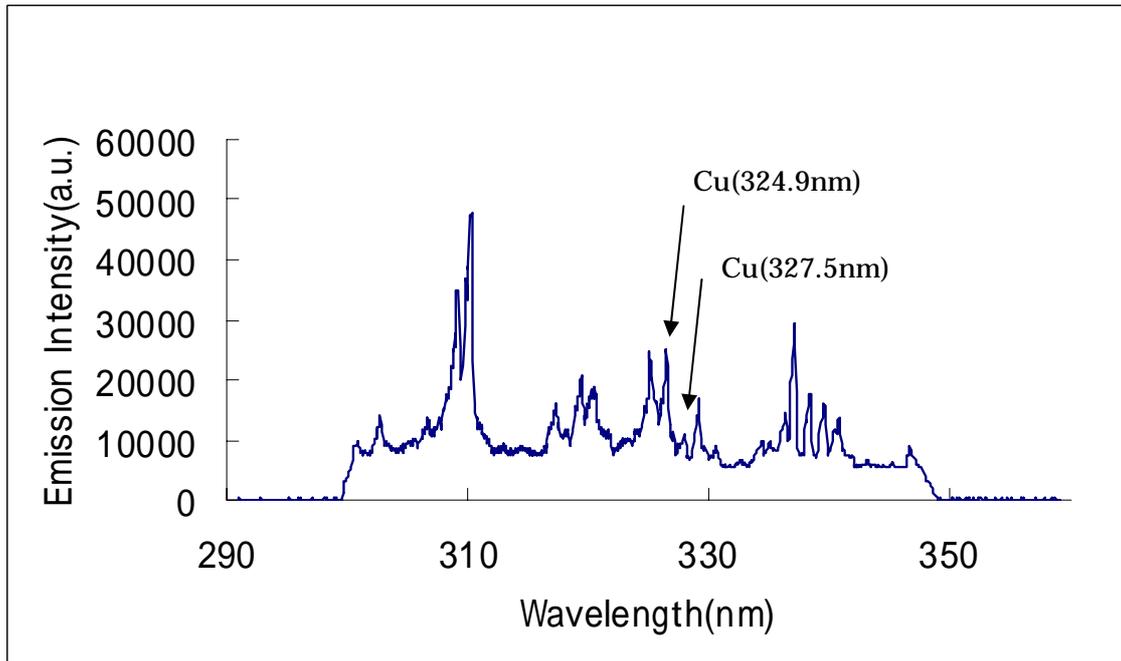


図 3.3.5-2 ヘリウムを雰囲気ガスとした場合の発光スペクトル

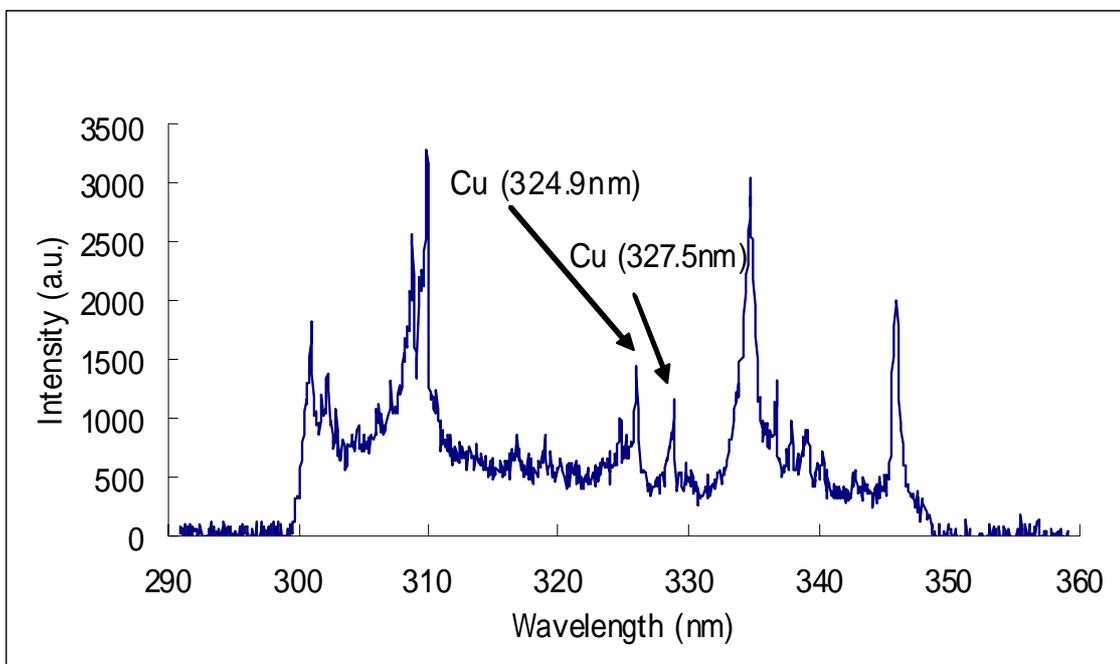


図 3.3.5-3 窒素を雰囲気ガスとした場合の発光スペクトル

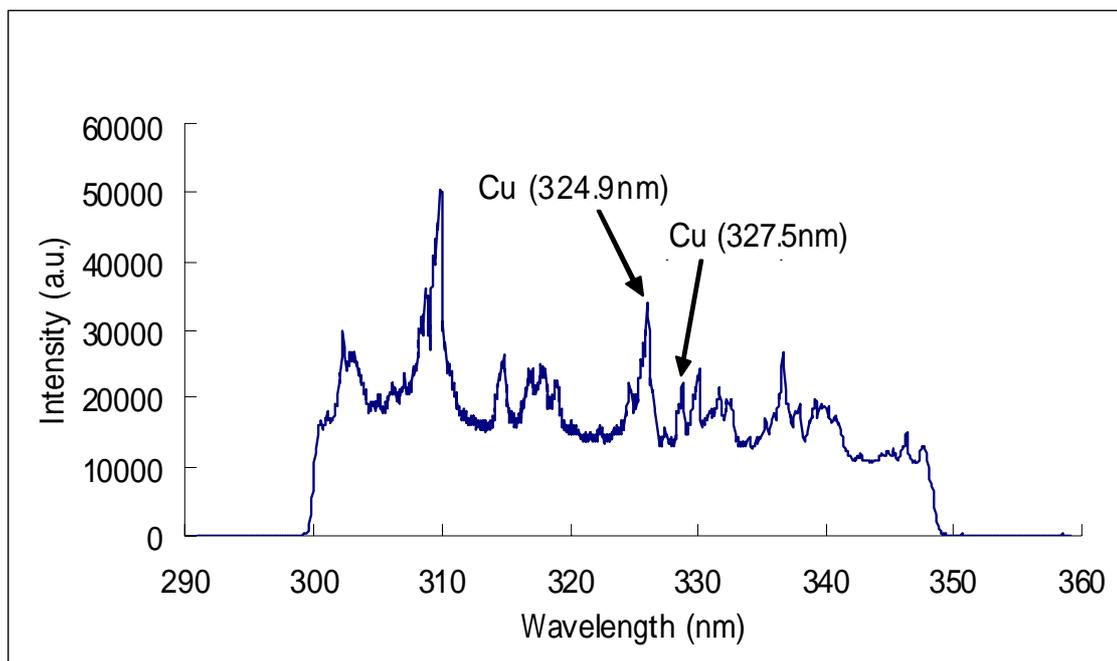


図 3.3.5-4 アルゴンを雰囲気ガスとした場合の発光スペクトル

以上の実験結果を比較すると、窒素ガスを雰囲気ガスとした場合、Cu 発光線とバックグラウンド成分の比が最も大きくなっており、良好なスペクトルが得られていると言える。

ヘリウムガスを使った場合も、Cu 発光線は明確に確認できるが、窒素ガスの場合と比較して特に大きな効果は認められない。また、アルゴンガスを使った場合、窒素ガスに比べて Cu 発光線は伸びるものの、バックグラウンド成分も高くなっており、良好な効果とは言えない。

汚染調査機械システムの実用化を目指す上で、空気を雰囲気ガスとすることができれば、経済性やメンテナンス性の観点からも有意義である。大気の成分の 8 割近くは窒素ガスが占めており、また上記の実験では、雰囲気ガスを空気とした場合でも、良好な発光スペクトルが得られている。これらのことから、空気を雰囲気ガスとすることも有効であると考えられる。

なお、同時に検討したガス圧の効果については、雰囲気ガスを大気圧とした方が、減圧とするよりむしろスペクトルは良好であった。

さらに、雰囲気ガスの吹きつけ流量を変化させて、ガス流量が発光スペクトルに与える影響について検討する実験を行った。

ガス流量が発光スペクトルに影響を与えられる理由は、以下のとおりである。

試料表面にレーザー光を繰り返して照射すると、発生したプラズマや微小な塵によって、後続するレーザーパルス光が遮られ、試料表面に到達するレーザー光のエネルギーが減少してしまうことがある。こうした現象が生ずると、試料表面におけるエネルギー密度の適正な管理が行えなくなり、良好な発光スペクトルが得られなくなると考えられる。

こうした現象に対する対策として、雰囲気ガスの照射点付近への吹きつけが有効であることが、これまでの研究である程度わかってきている。しかし、分析対象の性状により、ガス種やガス流量の適正值は異なると考えられ、特に、土壌を対象とした分析データが未整備の現状では、そうした適正值は未説明のままであった。

なお、プラズマや塵によるレーザー光の遮蔽に対する対策として、レーザー照射の繰り返し周波数を非常に小さくすることも考えられるが、分析感度の向上という目標に照らして、この方法は適切とは言えない。すなわち、短時間で多数回の繰り返しレーザー照射を行い、その間のプラズマ発光スペクトルを計算機上で平均処理すれば、ノイズ成分の低減された良好なスペクトルが迅速に得られると考えられる。単に繰り返し周波数を小さくしても、結果として良好な検出感度が得られる可能性は低く、雰囲気ガスの吹きつけによる対策がより妥当であると考えた。

雰囲気ガス種による検出感度への影響を検討した前述の実験において、窒素ガスが発光スペクトルの改善に有効であることが分かったので、本実験では、窒素ガスの流量と発光スペクトルの関係について調べることにした。

実験では、窒素ガスの流量を変えながら、発光強度の変化を調べた。

模擬汚染土壌試料は、砂質土 60%と 40%の粘性土を混ぜた土壌試料に、一定濃度の銅 Cu を混入したものをを用いた。

実験の結果、土壌の主成分元素、銅ともに発光強度が最も高い値を示すようなガス流量の適正值が存在することが分かった。

過大なガス流量で雰囲気ガスを吹きつけた場合には、ガス流量が 0 L/min の場合よりも、発光強度（土壌の主成分元素、銅ともに）が低下してしまうという結果も得られており、今後の測定に際しては、このことにも注意を払うべきである。

以上の実験による検討から、発光スペクトルの改善のための補助的手段として、雰囲気ガスの吹きつけを行う場合、望ましい雰囲気ガス種、及びガス流量の適正值に関する知見を得た。

3.3.6 土質の影響

3.3.1 で述べたように、十分なプラズマ発光を得るためには、分析対象の試料から原子が高速で噴出し、高速の衝撃波が駆動されて原子が熱的に励起されることが必要である。分析対象試料の硬さは、衝撃波の反作用を受けとめる役割を担うため、軟らかい土にレーザーを照射しても、強い衝撃波が得られず、十分なプラズマ発光が発生しないことも考えられる。

プラズマ発光に影響を与える要因として、土質や水分含有量、土の締固め度といった土壌性状が考えられるが、本節では、土質による影響を調べた実験について述べる。

実験では、土質の影響を検討するために、下記のような 3 種類の土壤材料に銅を混入させた模擬試料を用いて、発光スペクトルの比較を行った。

珪砂 100%の土壤試料（砂質土として）

珪砂 60%に、関東ローム 40%を加えた土壤試料（砂質・粘土質の中間的な土質として）

関東ローム 100%の土壤試料（粘性土として）

上記の各土壤試料に、一定量の銅 Cu を混入して実験に供した。

各模擬汚染土壤試料に、レーザーを照射して得られた分光スペクトルを以下に示す。

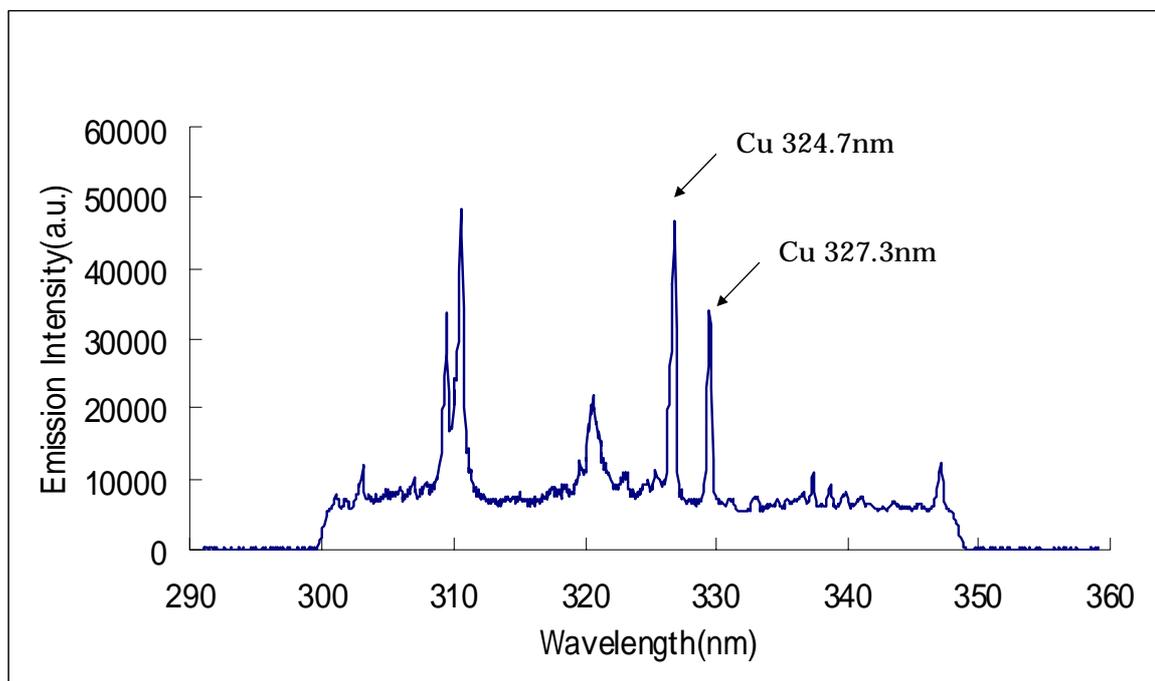


図 3.3.6-1 砂質土 100%に一定量の銅を加えた試料の分析結果

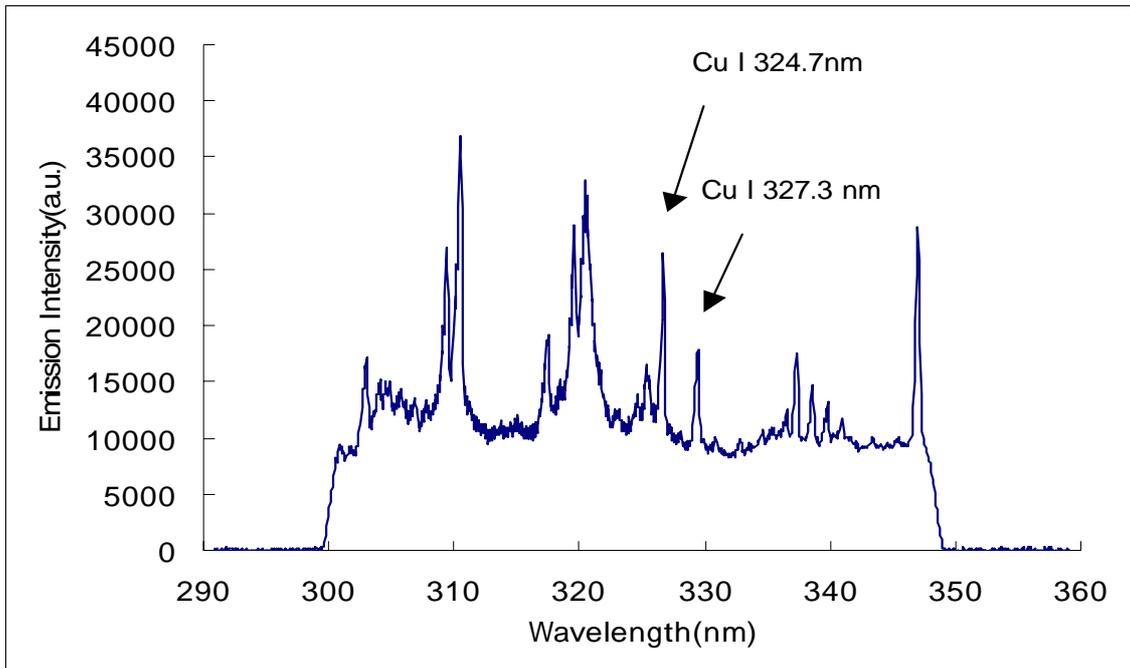


図 3.3.6-2 粘性土 40%・砂質土 60%に一定量の銅を加えた試料の分析結果

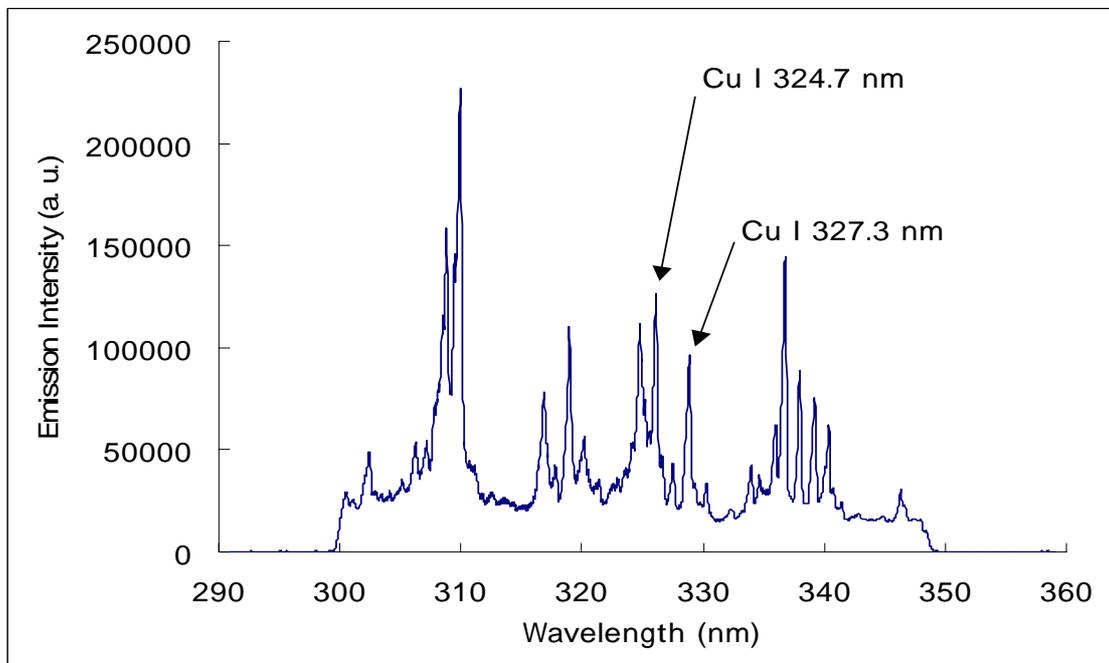


図 3.3.6-3 粘性土に一定量の銅を加えた試料の分析結果

図 3.3.6-1～図 3.3.6-3 を比較すると、銅の発光強度と周辺のバックグラウンドの比 (S/B) が最も大きいのは、砂質土 100%の場合である (図 3.3.6-1)。この場合には、バックグラウンド成分も小さく、銅の発光線を明瞭に確認できる。

粘性土を 40%程度含むようになると、銅の発光強度が小さくなるため、レーザー光のエネルギー密度を高め、検出器の露光時間を長くするといった操作により、銅の発光強度を高める必要があった。そうした操作により、銅の発光強度を大きくすることはできるが、同時にバックグラウンドの発光も強くなっていることが分かる (図 3.3.6-2、図 3.3.6-3)。

これらのことから、将来、粘性土を多く含む土壌についての検出限界を向上させる際には、砂を主に含む試料とは異なる感度向上策が必要になる可能性があることが分かった。

土質により、発光スペクトルに現れる銅の発光強度と周辺のバックグラウンドの比 (S/B) が異なる理由については、下記のように推察される。

粒径が比較的大きな砂質土などと重金属類が混在する場合、重金属成分は粒径の大きな砂粒子の周囲に付着した状態で存在すると考えられる。粒径の大きな砂質土などは、プラズマ発光に要するエネルギーしきい値が高く、かつプラズマ発光のエネルギー供給源となる高速の衝撃波を受けとめるだけの硬さを有していることから、付着した重金属成分が十分な発光強度を持ち、土壌自体の発光 (バックグラウンド) 成分は低く抑えられるため、良好な分析感度を得やすいと考えられる。

一方、粘性土などの微粒子を多く含む土壌では、重金属成分は微細な土壌粒子の間に入り込み、あたかも土壌粒子に包まれたような状態で存在すると考えられる。このような場合には、レーザーの照射によって、土壌粒子の固まりの外側は高温になって発光しても、内部には十分なエネルギーが伝わらないため温度が十分に上昇せず、内部に存在する重金属成分は蒸発しない (原子化・プラズマ化されない) 状態になっていることが考えられる。

以上の実験結果より、通常の埋立地及びその他の工業用地における砂質土を多く含む土壌では良好なスペクトルを得やすいことが分かった。また、粘性土のような微細な粒子を主体とする土壌の分析では、重金属の発光強度が比較的小さくなるが、単にエネルギー密度を増大したり、検出器の露光時間を長くするといった感度向上策によっては、バックグラウンド成分である多数の妨害線も強くなるため、微量の重金属の検出には、新たな高感度分析技術が必要となることが分かった。高感度化を図るための技術としては、例えば数 ns 以下の時間分解能で高精度に制御されたタイムゲートによる時間分解分光技術や、発光スペクトルにおける土壌の主成分元素の特徴から、土壌の性状を迅速判定し、予め取得しておいた土壌性状に適する検量線を選び使用するという技術などが必要になると考えられる。

前述の 3 種類の土質を模擬した試料を用いた実験により、砂質土のように比較的大きな粒子を含む土壌の場合、良好な検出感度が得られることが分かったので、砂質土の含有量が発光強度に与える影響について実験的に検討した。

実験の結果、砂質土の割合が多くなるに伴い、銅の発光強度が大きくなるという全般的な傾向が確認された。

以上のように、土質あるいは土壌材料の粒子径が、重金属元素の発光強度に影響を与えることが分かったので、レーザー照射時に生成されるプラズマ温度と土質との関係について検討を行った。

発光分光分析に用いる光源として、プラズマ温度を見積もることは重要である。例えば、燃烧炎のような化学反応によって発生するプラズマの温度は 2000~3000K 程度であり、放電プラズマやレーザー誘起プラズマの温度に比較するとはるかに低く、この程度のプラズマ温度では、励起エネルギーの高い原子を発光させることは困難である。ヒ素のような励起エネルギーの高い重金属原子を発光させるためには、少なくとも 5000K 以上のプラズマ温度が必要であり、各種の土質に対してレーザープラズマ分光法を適用する際にも、上記以上のプラズマ温度が必要となる。

そこで、粘性土に粒径の異なる 3 種類の砂を混入し、それぞれのプラズマ温度を調べた。

なお、ここで述べる温度とは種々のエネルギー準位の規定するところの励起温度を意味し、プラズマが熱平衡状態にあると仮定して、励起状態にある原子密度の分布から求められる値である。

ボルツマン分布が近似的に成り立つと仮定すると、発光温度の違う 2 つのスペクトル線の比を用いることで、プラズマ温度を算出することができる。今回の実験では、Cu(510.5nm)と Cu(521.8nm)の発光強度の比である $I_{\text{Cu}(521.8\text{nm})} / I_{\text{Cu}(510.5\text{nm})}$ を用いてプラズマ温度を算出した。すなわち、2 つの発光線における上下準位間で、ボルツマン分布が成立することが前提となる。

検討の結果、砂質土の場合、プラズマ温度は約 5000K、川砂（中粒径）は約 5800K、川砂（大粒径）で約 6200K と見積もられた。

プラズマ温度の算出法については下記のとおりである。

励起順位 n にある原子の密度を N_n 、順位 n より低い順位 m への遷移に対する自発遷移確率を A_{nm} とすれば、単位時間当たりの発光を伴う遷移の数は $N_n A_{nm}$ となる。その際、放出される光子 1 個あたりのエネルギーは、プランク定数を h 、光の振動数を ν とすれば $h\nu$ であるから、スペクトル線強度 I_{nm} は、

$$I = N_n A_{nm} h\nu \dots (3.6.6-1)$$

で表される。

発光プラズマは局所的には、熱平衡で近似できると考えられるので、励起状態の原子密度 N_n と基底状態の原子密度 N_0 との間には、ボルツマン分布則が成り立ち、

$$\frac{N_n}{N_0} = \frac{g_n}{g_0} \exp\left(-\frac{E_n}{kT}\right) \dots (3.6.6-2)$$

の関係が成立する。ここで、 g_n と g_0 はそれぞれ励起状態 n および基底状態 0 の統計重率、 E_n は励起状態の n の励起エネルギー、 k はボルツマン定数、 T はプラズマの絶対温度である。

さらに、(3.3.6-1)式、(3.3.6-2)式より次式を得る。

$$I_{nm} = N_0 \frac{g_n}{g_0} A_{nm} h\nu \exp\left(-\frac{E_n}{kT}\right) \dots (3.6.6-3)$$

ここで、(3.3.6-3)式を変形して両辺の対数をとると、下式が得られる。

$$\ln \frac{I_{nm}}{g_n A_{nm} \nu} = -\frac{E_n}{kT} + \ln \frac{N_h}{Z} \dots (3.6.6-4)$$

g_n 、 A_{nm} 、及び E_n が理論的・実験的研究により既知となっている何本かの同一原子種のスペクトル線に関して、その発光強度を測定し、 $\ln(I/gA)$ または $\ln(I/\nu gA)$ を E に対してプロットすれば、直線が得られる。その勾配である $-1/kT$ を求めれば T を計算することができる。

以上のように、土質（砂粒子径）の異なる土壤試料について、レーザー光を照射した際のプラズマ温度を算出したところ、粒子径の大きい砂を含む土壤ほど、プラズマ温度が高いことが分かった。このことは、土質による影響を検討した実験で、粘性土を主体とする土壤では重金属の発光が弱くなる現象と調和的であると言える。すなわち、粒子径の大きな砂を含む土壤では、プラズマ温度が高くなり、土壤中に含まれる重金属が十分に励起されるため、強い発光が観測されるが、粒子径の小さい砂の場合には、プラズマ温度が低くなり重金属が励起されにくくなり、観測される発光も弱くなると考えられる。

レーザー誘起プラズマの物理機構については、現在もなお未解明の点が残されており、特に土壤を対象とした先行研究事例では、物理機構に踏み込んだ研究はほとんどなされていないというのが実状である。本節で述べたような検討を重ねて、土壤に含まれる重金属の励起機構を解明していくことが、今後、さらなる検出感度の向上を図る上で重要である。

3.3.7 土壌の水分の影響

TEACO₂レーザーが発生する遠赤外波長の光は、水分に対する吸収率が高いことが知られている。土壌が多量の水分を含む場合、照射光の吸収によって、励起されるプラズマが影響を受ける可能性がある。また、土壌の水分含有量によって、同じ荷重で締め固めた場合でも硬さは異なるため、土壌に含まれる水分の影響を調べるために、土壌試料に一定量の水分を加えて、プラズマ発光特性の変化を調べた。

本節では、土壌に含まれる水分の量を下記により定義した。

$$\text{水分含有率 (\%)} = (\text{湿土重量} - \text{乾土重量}) / \text{湿土重量} \times 100$$

なお、実験装置の配置上、レーザー光は分析試料に対して水平な経路で入射させる必要があった。このため、プラスチックシャーレに入れた模擬汚染土壌試料は、分析する面を水平から 90 度傾けてチャンパー内に立てた状態で設置した。その際、プラスチックシャーレに入れた模擬汚染土壌試料が重力により崩れ落ちないために、試料作製の際に加える水は、水分含有量で 10～35%程度の範囲におさめなければならなかった。このような実験実施上の理由から、本実験では、10～35%の範囲の水分含有量について検討を行った。

実験的検討の結果、水分含有量が増えるにつれて全体として発光強度が少しずつ弱まる傾向が見られた。また、水分含有量が通常見られる土壌での値以上になると、発光強度が小さくなることが分かった。

水分含有量が、通常見られる土壌での値の範囲では、安定して強いプラズマ発光が得られていることから、水分による計測への影響は少ないと考えられる。一方、土壌が非常に高含水率の場合、各種元素の発光強度は低下しており、工場などとして利用されている土地では考えにくい。特に含水率が高い土壌への適用に際しては、水分量を低減するような補助的な手段を講じる必要があると思われる。

3.3.8 土壌の締固め度の影響

これまでに述べた実験では、プラスチックシャーレ内への土壌試料の成型時に、人力による（体重をかける程度の）加圧を行った。この時に加えた圧力は、 2kgf/cm^2 程度であった。

土壌試料の締固め度は、衝撃波形成に必要な原子噴出の反作用を受けとめるための“硬さ”に影響することから、締固め度の異なる土壌試料を製作してレーザー分光実験に供し、締固め度が発光スペクトルに与える影響を検討した。

本実験では、砂質土に一定量のクロムを添加した試料を用いた。締固め度は、プラスチックシャーレに入れた土壌試料の重量と、プラスチックシャーレの容積との比で定義される見かけ比重で表し、3種類の締固め度（見かけ比重）の試料を作製して実験に供した。

締固め度（見かけ比重）の異なる3種類の土壌試料に対する発光スペクトルを図 3.3.8-1 ~ 図 3.3.8-3 に示す。

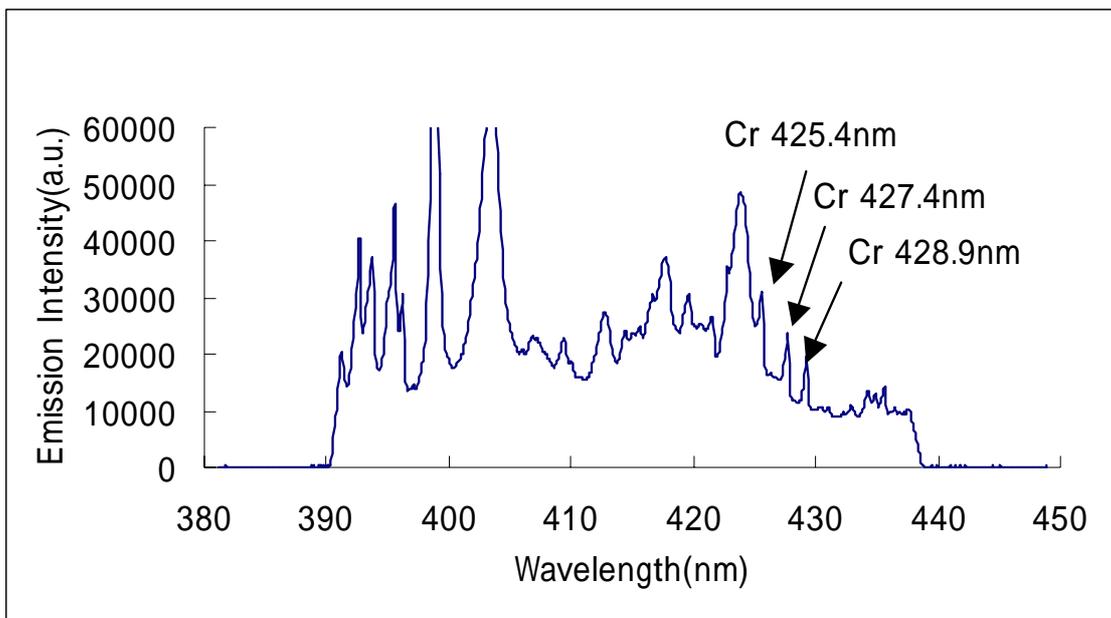


図 3.3.8-1 締固め度が大きい土壌の発光スペクトル

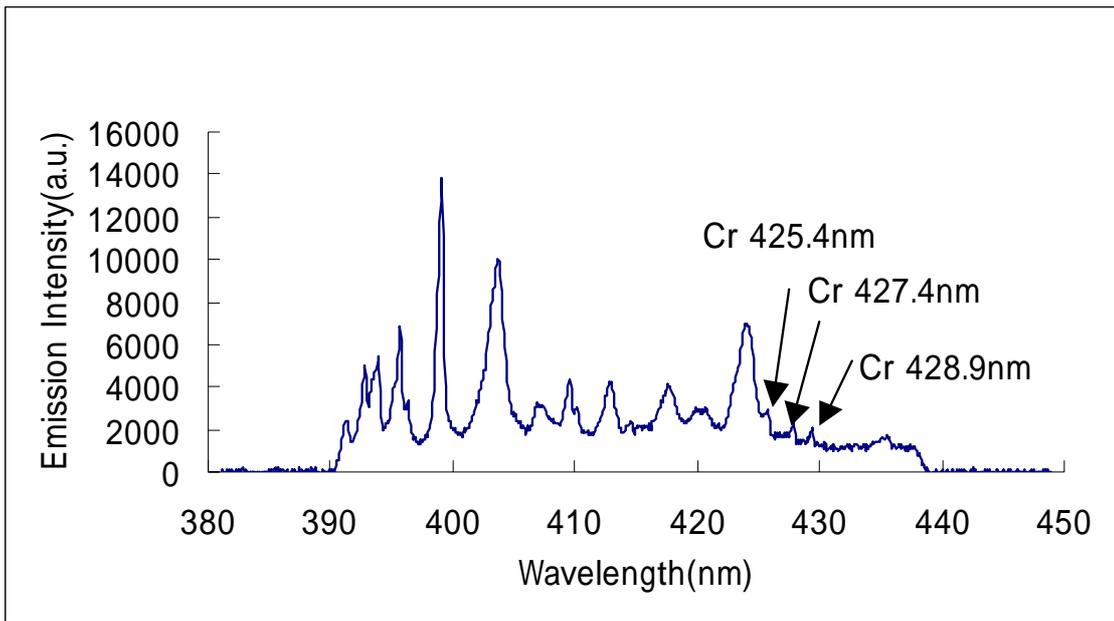


図 3.3.8-2 締固め度が中程度の土壌の発光スペクトル

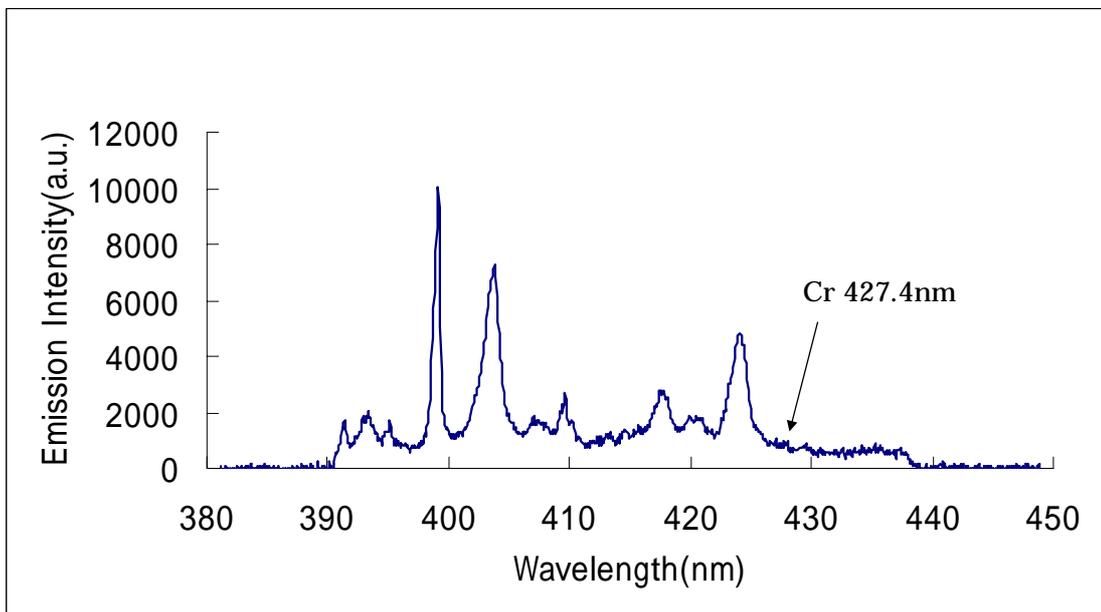


図 3.3.8-3 締固め度が小さい土壌の発光スペクトル

これらの図を比較すると、締固め度が大きいほど、良好な S/B (信号対バックグラウンド比) が得られることが分かる。また、以上のような検討により、高感度分析が可能な締固め度の範囲に関する知見を得た。

土中に筒状のプローブを貫入して、その側面の土壤にレーザー光を照射する場合、貫入圧力により周囲の土壤は相当の荷重で圧縮され、その荷重は人力でガラス製サンプル管を押しつけた時の荷重と比べてはるかに大きなものになると考えられる。

また、従来の YAG レーザーを使用した LIBS 法によれば、この程度の弱い加圧で成型した試料の分析は困難であったことから、本調査研究の意義は大きい。

分析に使用した模擬汚染土壤試料（プラスチックシャーレ入り）の写真を以下に示す。

下記の写真は、レーザー照射後のものであり、照射によって土壤試料に形成されたクレータの大きさにも注目すべきである。

締固め度が大きい試料の場合には、クレータはレーザー照射範囲のみに限られ小さいものであるが、締固め度が小さい試料の場合には、照射によって発生した衝撃波で土壤試料は周辺に押しつけられ大きな空洞部が生じていることが分かる。このような状態では、衝撃波形成とプラズマ発光に必要な原子噴出の反作用を受けとめるための“硬さ”が不十分であり、分析感度が低くなることは当然の結果であると言える。



図 3.3.8-4 締固め度が大きい試料の外観



図 3.3.8-5 締固め度が中程度の試料の外観



図 3.3.8-6 締固め度が小さい試料の外観

3.3.9 重金属の検出感度と検量線

前出の銅を用いたレーザープラズマ生成技術の検討によって、現時点での土壌分析に適したレーザー照射条件を定めた。

さらに、良好な分析結果を容易に得ることのできる土壌性状についての知見が得られた。

これらの銅による実験の結果をふまえて、鉛とクロム、及び励起エネルギーが低いことからヒ素の代替物質として選定した亜鉛について、その検出感度、及び検量線を確認するための実験を行った。

図 3.3.9-1 に一例として、4500mg/kg の鉛を含む土壌試料を分析した結果を示す。

また、各種含有量の土壌に対する発光スペクトルから、鉛の発光線（405.7nm）の強さを読み取り、土壌試料に含まれる鉛の濃度との相関をとったものが、図 3.3.9-2 に示す検量線である。

なお、本実験では、土壌の主成分元素の一つであるアルミニウムの発光線強度（394.4nm）で鉛の発光線の強度を割った値を用いることにより、プラズマ発光自体の変動の影響を低減し、高感度の分析が可能となったものである。

さらに、検量線における各点の値は、3 箇所を得られた発光強度の平均値である。

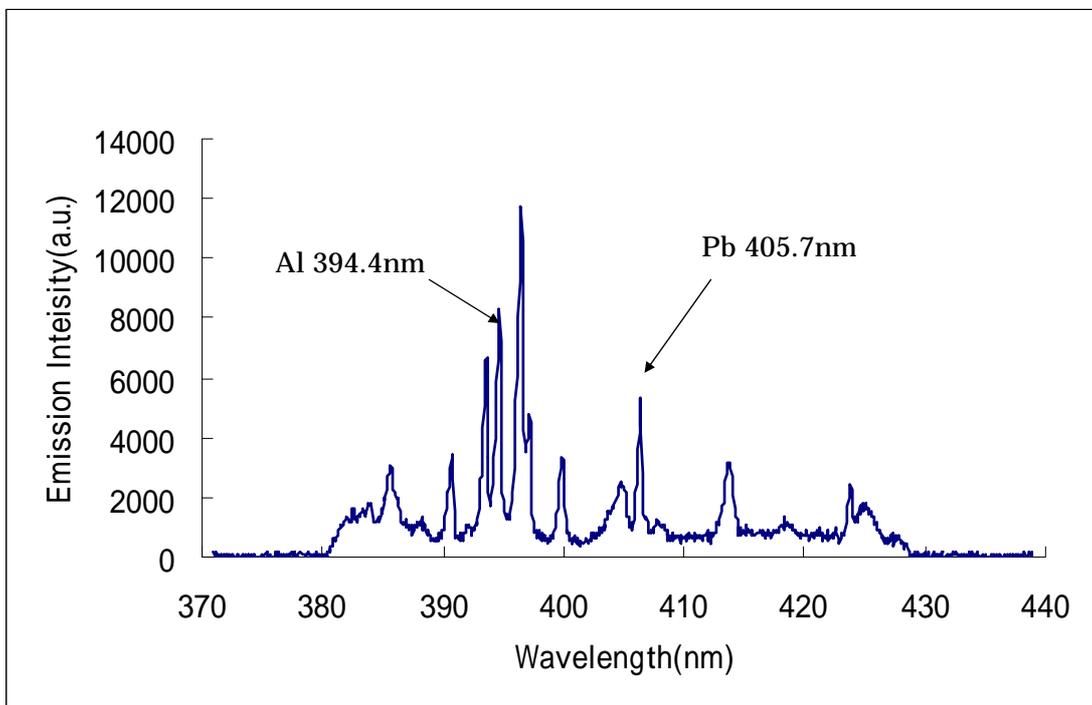


図 3.3.9-1 鉛 4500mg/kg の分析結果

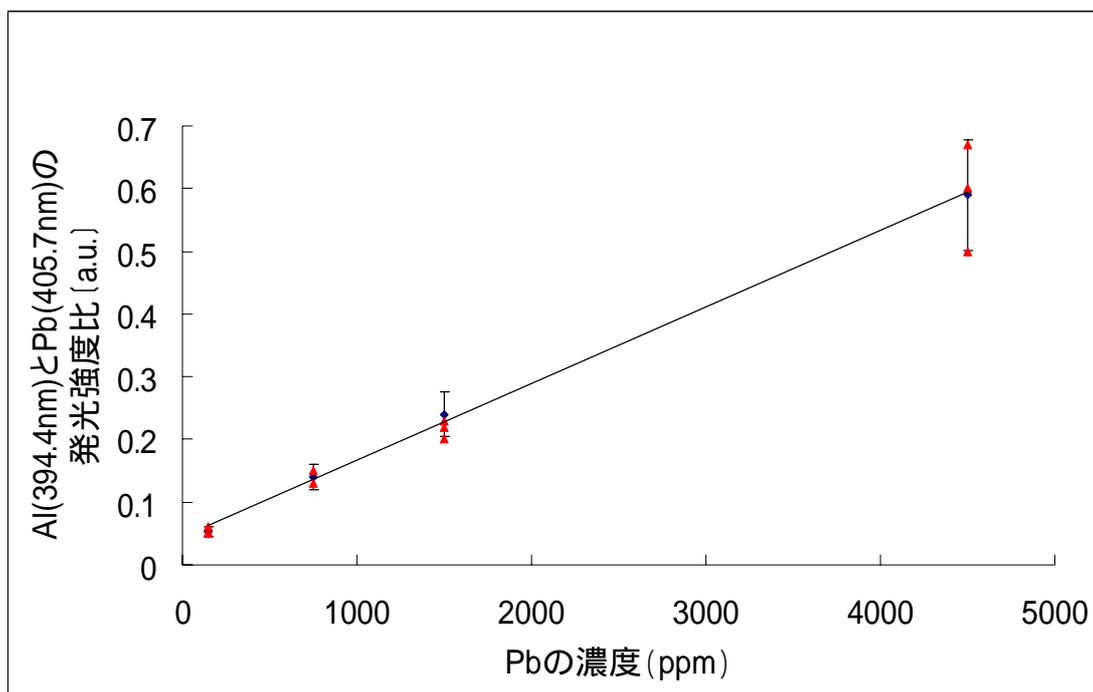


図 3.3.9-2 鉛の検量線（濃度と発光強度の相関）

以上の実験より、鉛については 150mg/kg の場合でも発光線を確認できた。また、各濃度の結果をもとにした検量線では、非常に直線性の良い結果が得られた。検量線の良好な直線性から、100mg/kg 程度の鉛の検出は可能であると判断される。

なお、検量線が原点を通過しない理由は、おそらく発光スペクトル上で、他の元素の発光線が鉛の発光線にわずかに重なっているためであろうと考えられる。

図 3.3.9-3 に、1250mg/kg のクロムを含む土壌試料を分析した結果を示す。

縦軸は、発光強度（相対値）を表し、横軸は光の波長（nm）を表す。

また、各種含有量の土壌試料における発光スペクトルから、クロムの発光線（427.4nm）の強さを読み取り、土壌試料に含まれるクロムの濃度との相関をとったものが、図 3.3.9-4 に示す検量線である。

なお、本実験では、土壌の主成分元素の一つであるアルミニウムの発光線強度（394.4nm）でクロムの発光線の強度を割った値を用いることにより、プラズマ発光の変動の影響を低減し、より高感度な分析が可能になった。

検量線における各点の値は、3 箇所で作られた発光強度の平均値である。

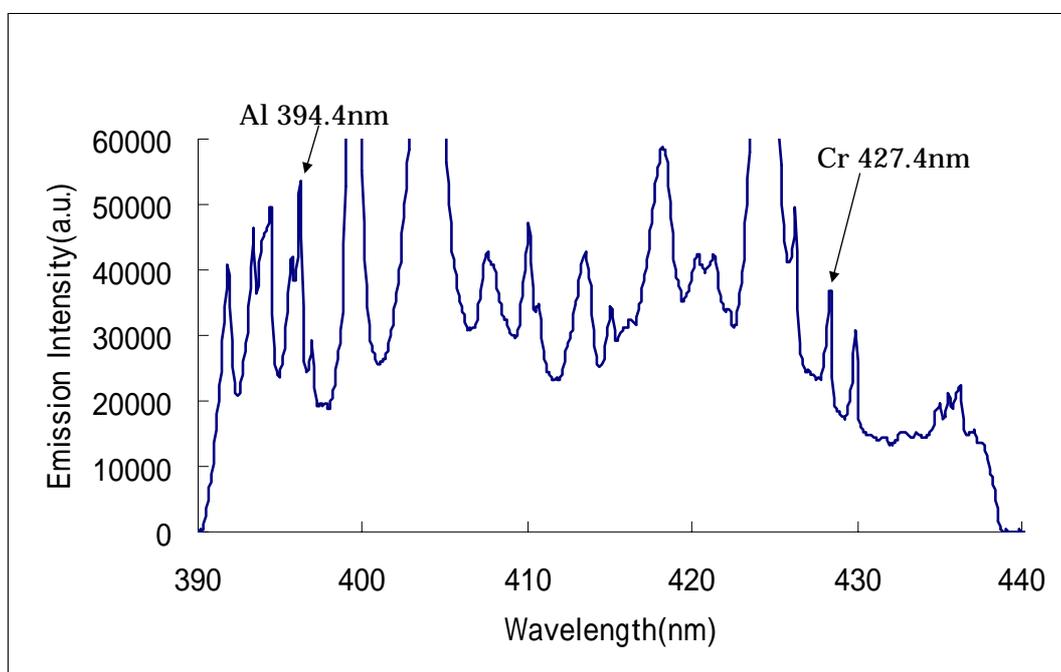


図 3.3.9-3 クロム 1250mg/kg の分析結果

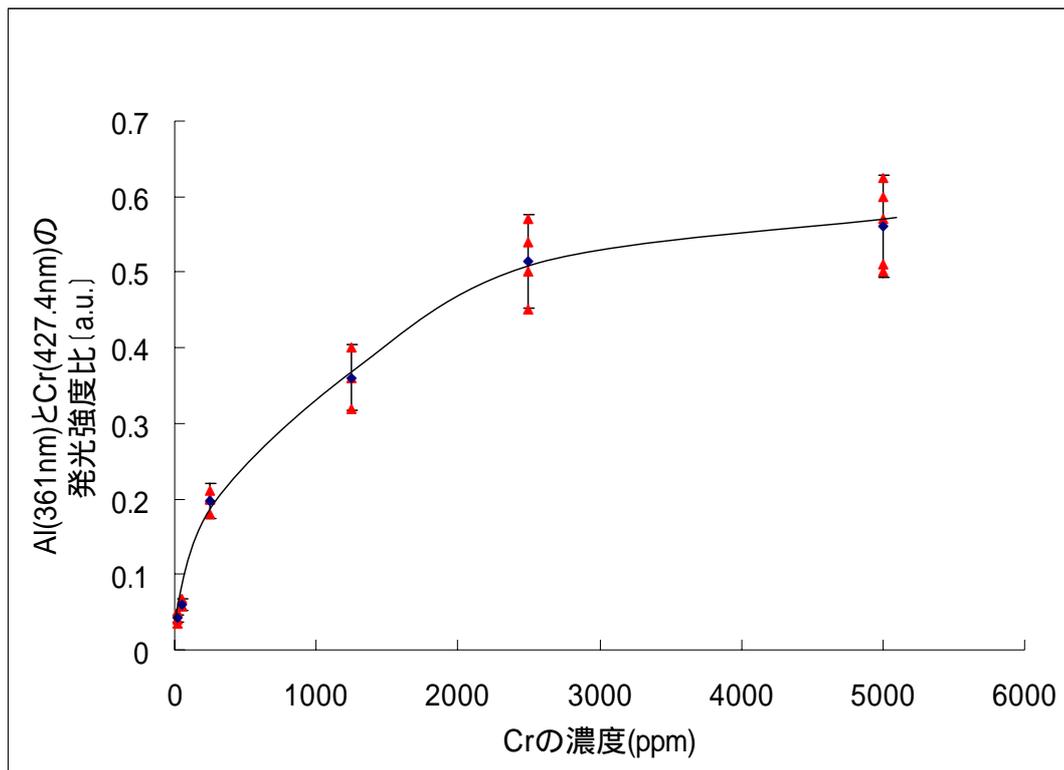


図 3.3.9-4 クロムの検量線（濃度と発光強度の相関）

以上の実験結果より、クロムについては 25mg/kg の場合でも、小さいピークではあるが発光線を確認できた。米国の Los Alamos National Laboratory をはじめとする先行研究で行われてきたような大きな荷重を土壌試料にかけることなく、数十 mg/kg の濃度を分析できる可能性が示されたことは、現時点では非常に大きな意義のある成果であろうと考える。

また、各濃度の結果をもとに、幅広い濃度域をカバーする検量線を作成した。検量線の直線性は、鉛の場合と比較すると良好とは言えないが、高濃度域と低濃度域で傾きが異なることはしばしば起こりうる現象であり、実用上は支障ないと言える。

なお、検量線が直線的でない理由は、今回用いたクロムの発光線が共鳴線と呼ばれる線スペクトルであり、自己吸収という現象が起こりやすいことに起因しているためと考えられる。すなわち、高濃度のクロムを含む試料の場合、プラズマ発光の外側にある比較的低温の領域に存在するクロム原子によって、高温プラズマ中で発生したクロムの発光が吸収されてしまうため、高濃度の領域では発光が比較的弱くなると考えられる。

先述したように、真空紫外領域に発光線を持つため、通常の分光器では検出困難なヒ素の代替物質として、本実験では、ヒ素に励起エネルギーが近い亜鉛の分析を行った。

図 3.3.9-5 に、一例として 1500mg/kg の亜鉛を含む土壌試料を分析した結果を示す。

縦軸は、発光強度（相対値）を表し、横軸は光の波長（nm）を表す。

また、各種含有量の亜鉛を含む模擬汚染土壌における発光スペクトルから、亜鉛の発光線（330.3nm）の強さを読み取り、土壌試料に含まれる亜鉛の濃度との相関をとったものが、図 3.3.9-6 に示す検量線である。

なお、本実験では、土壌の主成分元素の一つであるアルミニウムの発光線強度（309.3nm）で亜鉛の発光線の強度を割った値を用いることにより、プラズマ発光の変動の影響を低減し、より高感度な分析を可能としている。

さらに、検量線における各点の値は、3 箇所得られた発光強度の平均値である。

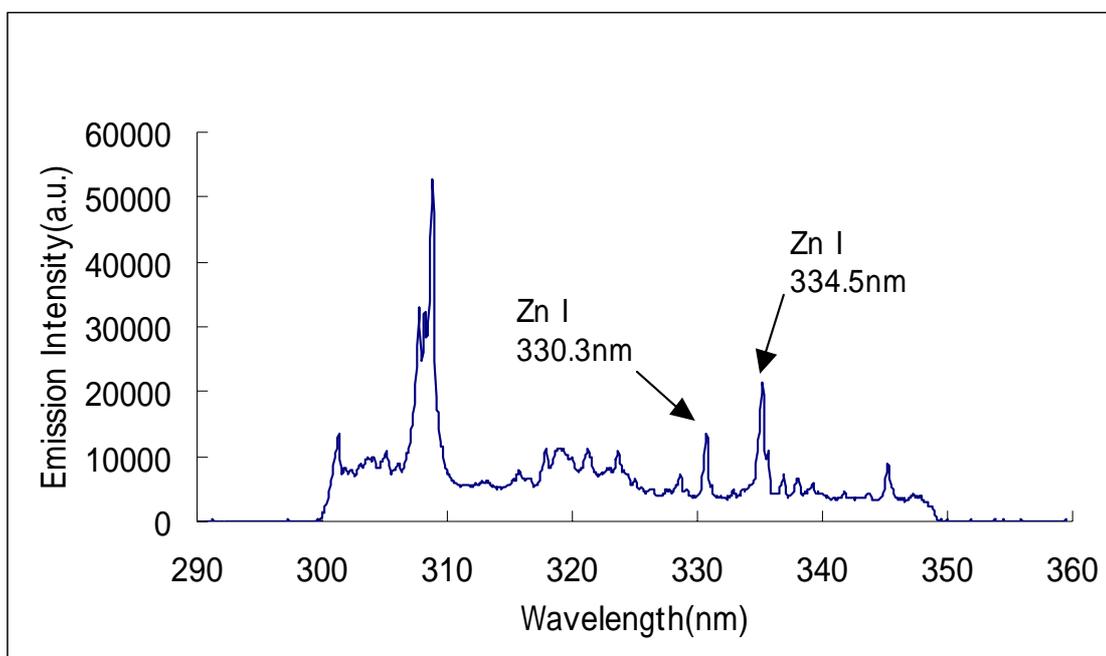


図 3.3.9-5 亜鉛 1500mg/kg の分析結果

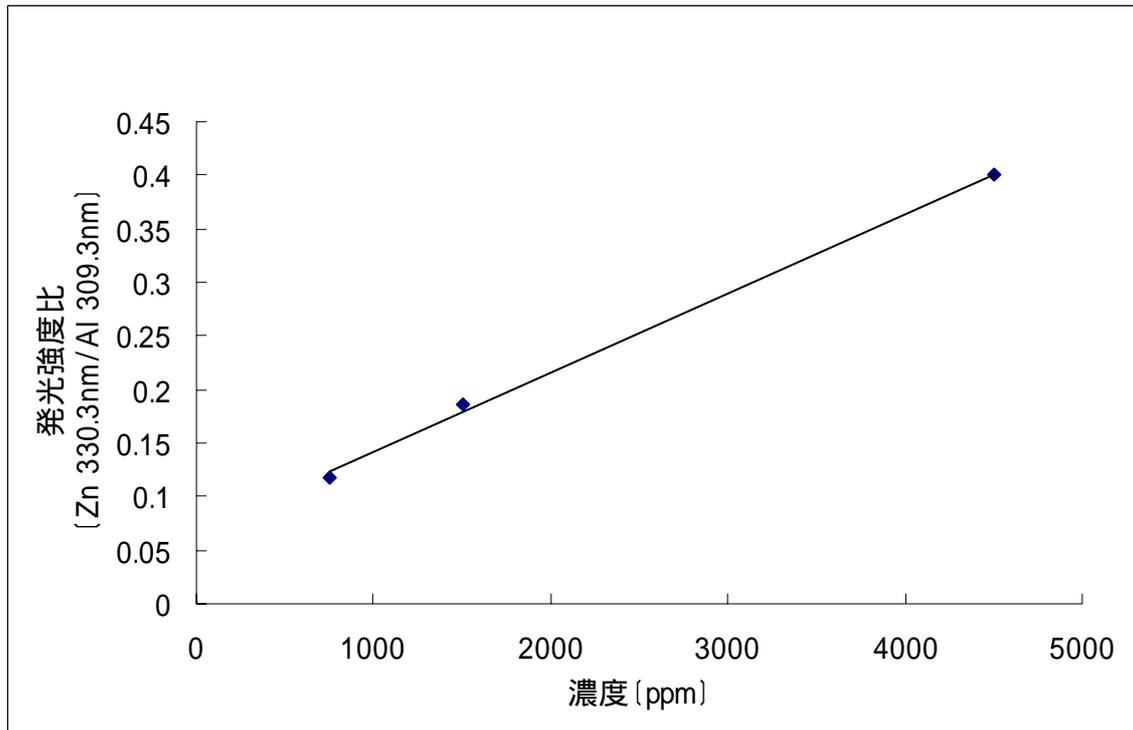


図 3.3.9-6 亜鉛の検量線（濃度と発光強度の相関）

上記の実験結果より、亜鉛については 150mg/kg の場合でも発光線を確認できた。また、各濃度の結果をもとにした検量線では、非常に直線性の良い結果が得られている。検量線の良好な直線性から、100mg/kg 程度の亜鉛の検出は十分に可能であると判断される。

なお、検量線が原点を通過しない理由は、鉛の場合と同様に、他の元素の発光線が亜鉛の発光線にわずかに重なっているためであろうと考えられる。

以上のように、銅による実験の結果をふまえて、鉛、クロム、及びヒ素の代替物質としての亜鉛について、検出感度と検量線の検討を行った。

実験の結果、本調査研究における 4 つの測定対象元素（鉛、クロム、ヒ素、水銀）については、100mg/kg 程度の濃度でも検出が可能であることが示された。数トン規模の荷重による加圧成型を経ずに、人力による加圧試料で 100mg/kg 程度の重金属を検出できたことは、国際的に見ても十分に意義のある成果であり、先行研究を大きく上回る要素技術の基礎が確立されたとともに、実用化を目指す要素技術開発の十分な可能性が確認された。

3.4 分析法の評価と課題の抽出

3.3.4～3.3.9 で述べた実験の結果、以下のことが分かった。

- ・砂質土を多く含む土壌に対しては、良好な検出感度を得やすいことが確認された。
- ・通常見られるような自然含水比の土壌については、水分の影響を受けない発光が得られた。
- ・非常に緩い土壌以外は、特に測定への影響を受けない測定技術が得られた。

土壌汚染の問題は、沿岸部に発達した都市部に多く、また重金属汚染の大半は比較的浅部で発見されていることは、3.1 土壌汚染の現状 に述べたとおりである。従って、上記のような土壌性状範囲は、実際に重金属で汚染された地域の大半にあてはまるものと考えられる。これらのことから、本技術は大半の重金属汚染が存在すると思われる土壌性状に対して、100mg/kg 程度あるいはそれ以下の重金属を検出できる可能性があると言える。

前にも述べたとおり、米国の Los Alamos National Laboratory をはじめとした国外の（主に軍事関連の）研究機関で、先導的な研究が着手されているところであるが、それらの事例においては、土壌試料に数トン規模の荷重を数分間加えたり、さらには土壌を固化剤と混合するといった方法で、試料を固化させることにより、ようやく 100mg/kg 程度の検出感度を得ているといったものである。

オンサイトで迅速な調査を可能にする機械システムの将来の実用化を目指す上で、本調査研究によって得られた要素技術は、国際的に見ても十分に新規性の高い成果であると考えられる。

一方、今後の課題としては、下記が挙げられる。

- ・実際の汚染土壌によって、性能検証を行う必要がある。

本調査研究では、各種の土壌性状の影響を検討するために、模擬試料を作って実験を行ったが、汚染調査機械システムの実用化設計に向けて、実際の汚染土壌を用いて適用性の確認試験を行い、課題を抽出し現実的な解決策を検討する必要がある。

- ・より低濃度の汚染検出を実現するために、また良好な適用性が得られる土壌性状範囲を拡大するためには、分析感度の向上が必要である。

本調査研究では、実用性の高い試料成型条件においては国内外を通じて初めて 100mg/kg 程度の重金属検出性能を確認できたが、水銀のような指定基準濃度が極めて低い物質を検出するためには、より高い検出感度が望まれる。

また、実際に重金属で汚染された地域の平均的な土壌性状とは異なるものの、良好な検出感度を得られる土壌性状の範囲を拡大することは、結果として未知の汚染の捕捉率を向上することにつながると考えられるため、より広い土壌性状について、検出感度の向上を図ることも将来的に必要な可能性がある。

- ・ヒ素のように真空紫外領域に強い発光線をもつ物質を検出するためには、特別な導光技術の開発が必要である。

前述のとおり、ヒ素の発光線は大気中あるいは光ファイバ中での減衰が大きい真空紫外領域に

属する。地中に貫入したプローブ部の先端に付けた光学窓から、地上の分光器まで真空紫外領域の微弱な光をできる限り減衰させずに伝送するためには、特別な導光技術が必要になる。現時点では、将来の関連技術の開発を待たねばならないが、例えば、中空ファイバなどの内部を不活性ガスで満たした導光路を工夫すれば、真空紫外光の伝送と地上での分析が可能になると考えられる。

(参考文献)

- 1) K.Kagawa, et al. Applied Spectroscopy, 8 (2004)
- 2) K.Kagawa, et al. Applied Spectroscopy, 2 (1998)
- 3) D.R Alexander, et al. US Army Corps of Engineers Miscellaneous Paper IRRP-97-2 (1997)
- 4) R.Krasniker, et al. Spectrochimika Acta Part B, 56 (2001)

4 . まとめ

本調査研究は、汚染の範囲や程度の迅速な把握を可能とする新しい汚染計測モニタリング技術の開発を目指して、レーザープラズマ分光分析法の土壤汚染計測に関する基礎的な可能性を検討したものである。

はじめに、土壤汚染の現状について調査し、各種汚染が多く発見されている地域や、汚染発覚事例数の多い物質、汚染面積の規模、汚染の原因行為などの概要を把握した。

次に、土壤汚染関連市場の動向について調査し、土壤汚染対策法の施行前後における市場動向や同対策法で規定される調査の実施状況について整理した。さらに、土壤浄化ビジネスの将来について展望した。

また、企業リスクとマネジメントという観点から、具体的な土壤浄化ビジネスの現状について調査し、リスクビジネスとしての土壤汚染評価事業の今後の展開について考察した。

さらに、土壤のオンサイト迅速分析に関する技術動向を、最近の学会報告に基づき調査した。その結果、土壤のオンサイト迅速分析に対するニーズは高いものの、従来技術の延長上にある現地サンプリング分析技術では、高密度の調査を迅速に行うことは難しいことが分かった。

続いて、汚染調査機械システム概念検討を行った。また、土壤汚染の実態統計に基づき、調査ニーズの高い汚染物質、調査すべき深度、目標とする検出感度の検討を行った。

土壤環境計測に対するレーザープラズマ分光分析法の適用性を検討するための実験を計画し、同分光分析法の性能に影響を与える因子を抽出して、実験パラメータを設定した。

その後、実験で使用する模擬汚染土壤の製法について検討した。実験の再現性を確保するために、土壤試料中に重金属ができるだけ均一に分散するような試料製作方法を検討した。

製作した模擬汚染土壤試料を用いて、レーザープラズマ分光分析実験を行った。実験により、エネルギー密度などのレーザー照射条件が、発光スペクトルに与える影響を検討し、適正なレーザー照射条件を明らかにした。

また、レーザーの繰り返し照射時に発生するプラズマや塵の影響を低減し、良好な発光スペクトルを得るための補助的手段として、雰囲気ガスの吹きつけ効果に関する実験を行い、ガスの種類や流量に関する有用な知見を得た。

上記で求めたレーザーの適正な照射条件をふまえて、土質や水分・締固め度といった土壤性状が検出感度に与える影響を、模擬汚染土壤試料による実験で検討した。

土質の異なる模擬汚染土壤試料を用いて、レーザープラズマ分光実験を行い、砂質土や粘性土といった土質が分析感度に与える影響を検討した。

さらに、土壤水分量、及び土壤の締固め度についても、模擬試料を用いて分析感度に与える影響を評価した。土質の場合と同様、大方の範囲において、レーザープラズマ分光分析法で良好な検出感度を得ることができた。

その結果、良好な分析感度が得られる土壤性状が明らかになり、土壤汚染の実態調査結果に基づいて重金属汚染がしばしば発見される土壤性状と比較することによって、実際の重金属汚染土壤に合致する大半の土壤性状について、今回の基礎実験レベルでも 100mg/kg 程度の重金属を検出できる可能性があることを確認した。さらに、微量の汚染を高精度、高信頼性で検出するためのブレークスルーの知見が得られた。

本調査研究で測定対象とする4種の重金属元素について、当該元素を実際に含む土壌試料あるいは励起エネルギーの近い代替物質を含む試料を用いて分析感度の検討を行い、いずれの重金属元素についても100mg/kg程度の検出が可能となった。

各種重金属を一定量含む模擬試料の分析により、検量線を求めた。検量線の作成にあたっては、測定対象である重金属の発光強度と、土壌の主成分元素との発光強度の比を用いる方法を考案し、プラズマ発光強度の変動の影響を低減することで、良好な検量線を得ることに成功した。

また、国外の最先端研究事例に見られるような、試料の過大な加圧による感度向上策を採用せず、まさに世界でも初となるその場分析の条件に向けて、海外の先端研究状況を上回る検出感度を現実に近い試料で達成できた。

5 . 調査研究の今後の課題と展開

今後に残された課題として、以下を挙げることができる。

実際の汚染土壌試料を用いた実験による要素技術の性能検証
各種重金属元素の分析感度向上実験及び、必要に応じ補助的な感度向上策の追求
一定量のヒ素や水銀を実際に含む試料での検出感度確認再現

の実際の汚染土壌試料を用いた要素技術の検証では、実際の土壌汚染地域から採取した土を用いて、土質、水分含有量、締固め度といった土壌性状が、レーザープラズマ生成に与える影響を検討することにより、要素技術の性能検証と実用化に向けた課題の抽出が可能になる。

に関しては、新しい分析技術を研究することにより、各種重金属元素の分析感度の向上を追求する。より高い分析感度を達成することができれば、水銀のように指定基準濃度が極めて小さい物質の汚染判定が可能となる。しかし、これまでの実験で使用してきた汎用の OMA (Optical Multi-channel Analyzer) では、レーザー光の照射条件など実験パラメータを種々調整しても、Cu、Pb、Zn は 100mg/kg 程度 (Cr は数十 mg/kg) が限界であると考えられる。水銀のような指定基準値が非常に小さい物質を精度良く検出するためには、数十 mg/kg 以下の検出感度を達成する必要があり、将来的にはその程度の性能が得られるように、タイムゲート機能を追加して時間分解分光技術を研究することや、土壌性状に合った検量線の取得・較正技術を研究することによって、様々な分析感度向上技術が実現する。

については、代替物質で実現性を確認した分析性能を検証するために、将来、実際に一定量のヒ素や水銀を含む土壌試料を用いて、検出感度の確認と再現性の確立を図る必要がある。

本調査研究成果は、土壌のオンサイト迅速分析という、環境計測分野における革新的技術の中核をなす先導性の高い技術シーズである。

今後、この調査研究で得られた知見ならびに可能となった分光測定プロセスに基づき、実用化に向けた要素技術の開発を進めることによって、上記の検討課題を解決し、検出感度の向上と適用範囲の詳細な把握が図れる。これにより、汚染調査効率の飛躍的な向上を可能とする新しい汚染調査機械システムの設計が行えると確信される。

システム技術開発調査研究 16-R-15

土壤環境汚染計測モニタリング

機械システムに関する調査研究報告書

(要 旨)

平成 17 年 3 月

作 成 財団法人 機械システム振興協会
東京都港区三田一丁目 4 番 28 号
TEL 03-3454-1311

委託先名 財団法人 エンジニアリング振興協会
地下開発利用研究センター
住 所 東京都港区西新橋一丁目 4 番 6 号
TEL 03-3502-3671