

[重点研究の報告]

# 地質地盤環境の保全と土地の適正利用に関する研究

地質地盤・騒音担当 土壌・地下水汚染対策チーム

## 1 背景と目的

大地は工場・生活排水の浸透、廃棄物の埋立処分及び大気汚染物質の降下などにより、汚染物質の最終的な蓄積場となる。これらは地下水流動により地下の広域・深部に拡散する。この大地の汚染は非顕在的進行と長期残留性を特徴とし、将来的に深刻な環境問題を引き起こすことが懸念される。また、大地は人類史の始まりとともに人為的な環境の改変を受け続けてきた。特に本県では急速な都市域の拡大に伴って、地盤の自然環境特性に調和しない土地利用が進み、地震などの災害危険性が增大している。

このような背景のもとに、当センターの開所と同時に地質地盤環境分野の研究体制を整備して、表題の重点研究を開始した。この研究を重点化した第一の目的は、地質地盤環境に関する中長期的な研究目標を定め、個別研究課題を体系的に実施することにより、新規分野の研究活動を円滑に立ち上げることにある。また、直面する土壌・地下水汚染問題について、行政への技術支援体制を速やかに整備することも重点化の主要な目的である。

## 2 研究の構成及び実施体制

本研究では、はじめに上述の目的に沿って、中長期的な研究目標の体系化と実施体制の整備を行った。長期目標(10年～20年)は、「背景」に述べた現状認識に基づいて、

I. 土壌・地下水汚染問題の解決 (環境保全分野)

II. 土地利用適正化の推進 (都市計画・防災分野)

に設定した。図1は、長期目標達成のためのアプローチとして中期目標(5年～10年、1.～3.)を位置づけ、その内容(○)及び中期目標を実現する個別研究課題(期間)を体系的に示したものである。

実施体制は、特に I の土壌・地下水汚染問題については、地形・地質学や分析化学など多様な専門分野の知識が必要となるため、各研究グループ(水環境、廃棄物管理、化学物質、地質地盤・騒音)からスタッフを集めた「土壌・地下水汚染対策チーム」を結成した。なお、このチームは重点研究の遂行のためだけでなく、個別の汚染問題について行政依頼調査も実施する永続的な組織である。一方、II の分野については、地質地盤・騒音グループが従事した。

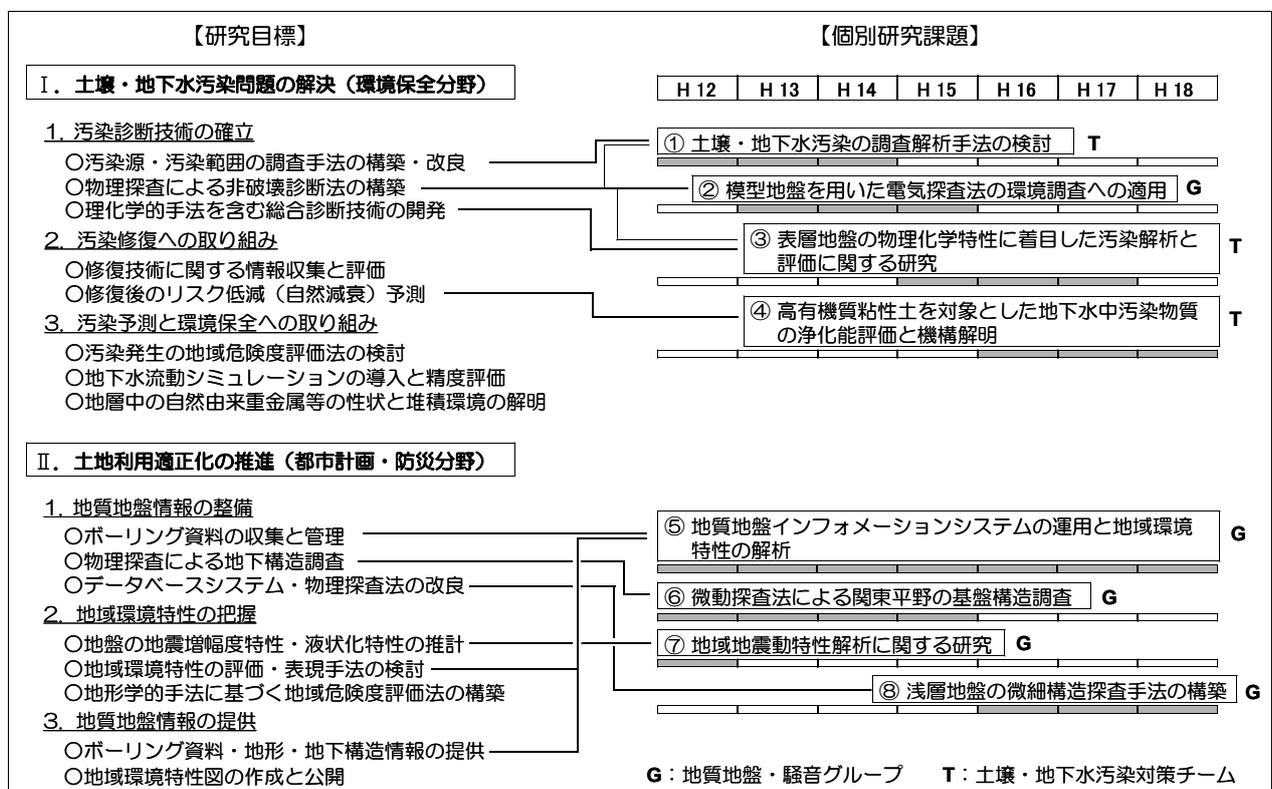


図1 「地質地盤環境の保全と土地の適正利用に関する研究」の体系

### 3 研究の全体概要と今後の展望

#### 3.1 環境保全分野

図1に示した「I. 土壌・地下水汚染問題の解決」のアプローチの中で、自治体研究機関の立場から「1. 汚染診断技術の確立」を最優先と考え、個別研究課題(図1、①～③)を中心に研究を展開した。①では実際の汚染現場を対象として、地形・地質学的手法や物理探査などの適用方法を検討し、②では特に電気探査法について、汚染調査への適用性に関する基礎的な検討を行った。③は、さらに、汚染物質の特定も含む総合的な汚染解析法の構築を目標として研究を進めている。これら一連の研究成果のうち、特に①では「数値標高モデル・空中写真を利用した汚染源の概査法」を構築し、③では「土壌中重金属類の高感度・簡易計測法」の実用化の道を開いた。これらは行政依頼調査で有効に機能することが実証された。

一方、「2. 汚染修復」及び「3. 汚染予測・環境保全」への取り組みは、高有機質土壌がもつ汚染物質の自然浄化能に注目した研究(④)が進められているが、現時点ではごく一部に限られている。これらのアプローチは、汚染の未然防止や環境改善の実現に必須であり、今後、より積極的な研究展開が必要である。

#### 3.2 都市計画・防災分野

「II. 土地利用適正化の推進」へのアプローチでは、「1. 地質地盤情報の整備」と「2. 地域環境特性の把握」を優先して、個別課題に取り組んでいる(図1、⑤～⑧)。すなわち、⑤ではボーリング資料を中心とした地盤情報データベースを構築して、地域の地盤が固有にもつ環境特性の推計方法を検討してきた。⑦はその関連として、特に強震動が作用したときの増幅度を推計したものである。また、ボーリング資料の得られない深部構造データを収集するために、⑥で新しい探査法(微動探査法)を実用化し、県南部平野の基盤構造を明らかにした。この微動探査法は、⑧で帯水層分布などの浅層微細構造を推定する手法に改良され、地下水汚染調査への適用も視野に入れている。

このように探査法を含む地質地盤情報の収集とその解析方法について実績を上げてきたが、今後は行政及び県民へのわかりやすい情報提供の方法に取り組む必要がある。

以上の全体概要に示すように、中長期目標に沿って体系化された個別課題のうち、特に緊急性の高いものについては相応の実務的な成果をあげ、新規分野の研究及び行政支援の基本的な方向性と実施体制が確立されたと考える。今後は、中長期目標の実現に直接結びつく研究課題(汚染修復・環境保全、情報提供関係)を積極的に進める予定である。以下にこれまで実施した個別課題の概要(4.)を示し、その主要な研究業績(5.)をとりまとめた。各概要の文末の番号により、関連する業績を参照することができる。

### 4 個別研究課題の概要

#### ① 土壌・地下水汚染の調査解析手法の検討

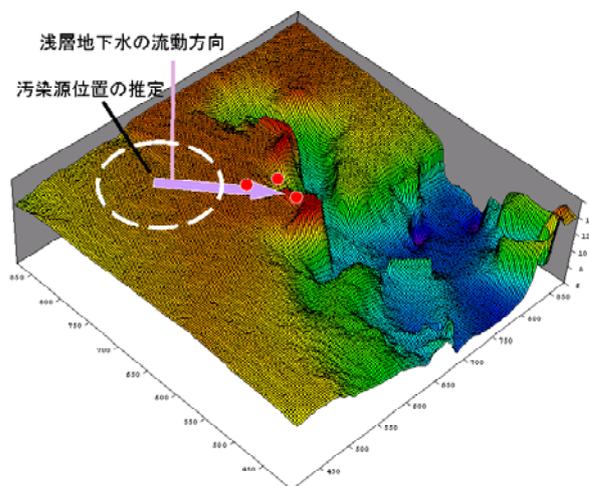
高橋基之、長森正尚、八戸昭一、佐坂公規、山川徹郎  
(土壌・地下水汚染対策チーム)

近年、顕在化している土壌・地下水汚染は、過去における有害化学物質の不適切な使用や廃棄物の不法投棄等に起因するものが主であり、現在の汚染状況とともに時代を遡った地質地盤環境の把握がその対策に重要となる。本研究は、実際の汚染現場を対象として、地形・地質解析、物理探査及び土壌ガス計測など様々な手法を適用し、その有効性を検討したものである。

地形・地質解析については、新旧の地形図、地質図、ボーリングデータ、空中写真等の既存資料の活用方法を検討した。具体的には一般環境にVOCs地下水汚染が広がっている地域において、数値標高モデル(DEM)の解析結果から浅層地下水の賦存状況や流動方向を推定し(図①)、空中写真の分析から過去の汚染源施設を特定することができた。また、表層地質を確認しながら行う簡易土壌ガス計測により、的確な汚染源の絞り込みが可能であることを確認した。さらに廃棄物埋立地盤における格子状測線配置の電気探査によって、地下水面や埋立層の3次元分布の推定が可能であることを示した。

地形地質や土地利用に関する既存資料を整理し、その利用方法を取りまとめることは、汚染発覚時の初動調査に有効であり、簡易計測を含めた調査手法は、行政担当者においても十分に対応可能である。物理探査の地盤環境汚染調査への適用は、新しい分野として今後その進展が期待されるが、探査結果の解釈方法の確立や適用限界について基礎及び応用研究の積み重ねが必要である。

[1]～[3]]



図① 数値標高モデル(DEM)による地形条件の把握と浅層地下水流動の推定

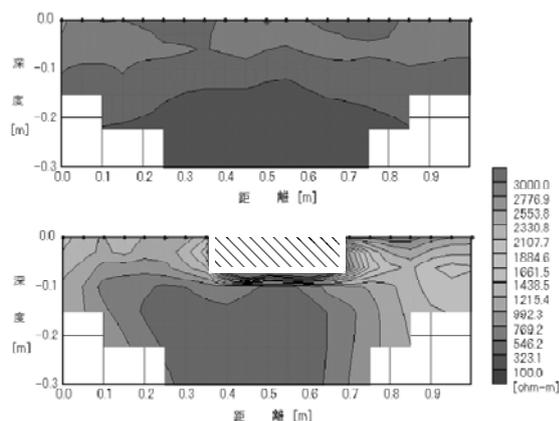
## ② 模型地盤を用いた電気探査法の環境調査への適用方法に関する研究

佐坂公規、八戸昭一（地質地盤・騒音担当）

電気探査法は主に地下資源探査技術として発展してきたが、近年、土壌・地下水汚染などの環境調査にも適用されつつある。しかしながら、汚染現場での探査結果の解釈方法（汚染状況が比抵抗断面にどのように現れるか）や適用限界（濃度、物質、深度など）の検討が不十分であるため、現時点では実用手法として確立していない。そこで本研究では、主に比抵抗断面を高い確度で解釈する方法を確立するために、土質試料や模型地盤を用いて、比抵抗測定に影響を与える因子について基礎的な検討を行った。

その結果、間隙水の比抵抗、試料の間隙率、粘土鉱物含有量を因子とした場合、土質試料の比抵抗変化は間隙水の比抵抗による影響が支配的であり、イオン系物質による汚染への適用可能性が示された。一方、非水相液体ではこうした影響は見られなかったが、間隙水分布の連続性を妨げるような高濃度条件下では検出が可能であった。さらに模型地盤を用いた油汚染の模擬的な電気探査により、汚染域の位置・形状が高比抵抗領域のそれと調和的であり、未汚染域と明確に区別できることを確認した（図②）。

本研究成果は汚染現場での比抵抗断面の解釈を一般化する基礎資料を得るとともに、土壌・地下水汚染調査への電気探査法の適用可能性を示唆するものである。本研究は課題③に引き継がれ、実用手法の確立を目指す。[4]



図② 模型地盤の比抵抗構造断面図

（上：未汚染のもの、下：汚染域〔白枠〕を設けたもの）

## ③ 表層地盤の物理化学特性に着目した汚染解析と評価に関する研究

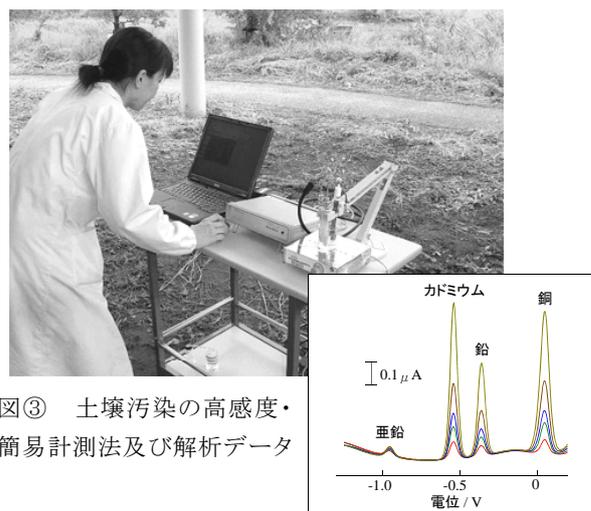
長森正尚、佐坂公規、石山 高、八戸昭一、高橋基之（土壌・地下水汚染対策チーム）

多様化する土壌汚染問題に対処するには、正確で詳細な汚染状況を迅速に把握する必要がある。本研究は現場

で使用可能な新しい土壌汚染評価システムを構築するために、A. 物理計測を主体とする汚染調査技術の構築及び B. 電気化学的手法に基づく簡易計測法の開発に取り組んでいる。

Aの研究では土壌電気伝導度計（土壌EC計）や物理探査の汚染調査への適用手法を検討し、これまでに土壌EC計により、浅層部の汚染分布を迅速に概査できることを実証した。また、Bの研究では簡易計測法として高感度な電気化学分析法であるストリップングボルタメトリーの適用を試みるとともに、操作全体の簡略化について検討した。その結果、土壌採取から分析までの所要時間は公定法に比べて大幅に短縮した。この方法は鉛、カドミウム等の測定に応用可能であり、土壌中重金属類の現場計測技術として高い実用性をもつ（図③）。

汚染場所・範囲の推定から汚染物質の特定までを現場で実施する本システムは、迅速かつ確な行政判断を行う上で重要な役割を果たすものと考えられる。また、汚染調査技術の簡略化は評価・解析に要する時間、労力及びコストの削減にもつながり、経済性や環境負荷低減の面においても貢献が期待できる。[5]～[7]



図③ 土壌汚染の高感度・簡易計測法及び解析データ

## ④ 高有機質粘性土を対象とした地下水中汚染物質の浄化能評価と機構解明

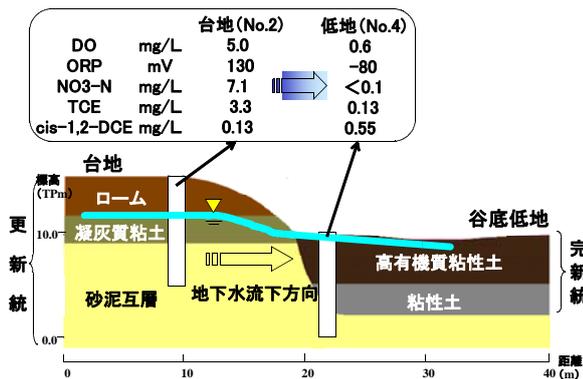
高橋基之、八戸昭一（土壌・地下水汚染対策チーム）

地下環境に広く拡散した汚染地下水の浄化対策は、経済性及び技術的限界から困難である。そこで汚染源の対策を完了した次の段階として、自然の持つ浄化能（自然減衰）を活用した修復手法が注目されている。本研究は、汚染物質の分解が実際に確認されている地域の地形・地質条件から、その分解メカニズムを解明し、大地が潜在的に有すると考えられる浄化能を評価していくものである。

低地（谷底低地や後背湿地など）には、植物が枯死した後、嫌氣的湿潤環境で分解不十分のまま堆積した高有機

質粘性土が広く分布し、その有機物含量は通常の土壌に比べて非常に多い。この有機物は分解過程で電子供与体として作用し、硝酸性窒素は脱窒素反応が、また有機塩素系化合物は塩素と水素の置換反応が進行すると推論される。本研究では、実際のフィールドでこれらの現象が進行していることを検証する。さらに、高有機質粘性土が形成する還元的環境条件を実験的に再現し、分解メカニズムを解明するとともに、反応速度論的解析から浄化能を評価する。

硝酸性窒素による地下水汚染分布解析では、台地における顕著な汚染が低地に移行して減少していることを推察した。また、有機塩素系化合物により汚染された台地の浅層地下水が、流下方向の低地で還元分解されていることを確認した(図④)。谷底低地から採取した高有機質粘性土を用いた室内実験では、土中の有機物が飽和地下水の嫌気的環境形成及び脱窒反応の促進に対して寄与していることを定量的に明らかにした。しかし、有機塩素系化合物の還元分解は容易に進行せず、より強い嫌気状態の形成や粘性土中金属類の触媒作用に関する化学的要因の解明を行う必要がある。今後は、低地が保持している浄化能を定量的に評価していくとともに、高有機質粘性土を利用した浄化技術開発の基礎資料となる知見を集積していく。



図④ 台地低地間の地下水流動と汚染物質の分解

### ⑤ 地質地盤インフォメーションシステムの運用と地域環境特性の解析

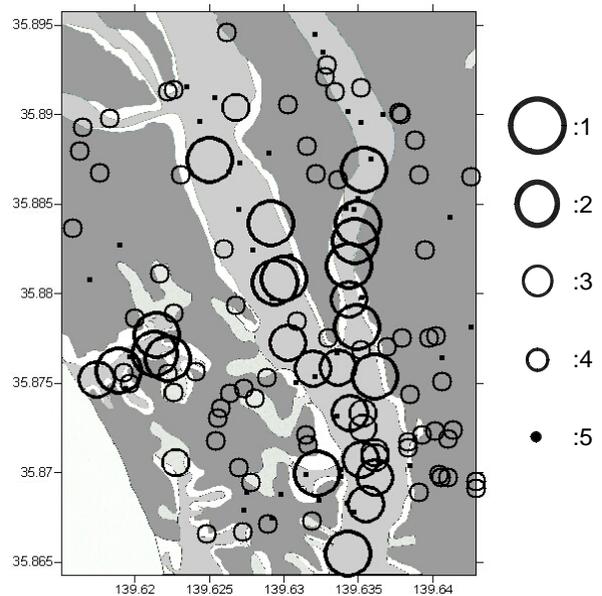
八戸昭一、松岡達郎、白石英孝、佐坂公規 (地質地盤・騒音担当)

土壌・地下水汚染や県土の無秩序な開発等を防ぐためには、県内各地域の地質・地盤に関する情報を詳細に把握する必要がある。本研究は当所で開発されたボーリングデータベースシステム(埼玉県地質地盤インフォメーションシステム;約14,000データ)を運用し、各部局へのデータ提供及び地域固有の地盤環境特性の解析を行っている。

本研究では、地盤環境保全や地震防災・都市計画に利用可能なマイクロゾーニング(災害や汚染の地域危険度評価)の確立を目的として、種々の地盤環境特性の把握と危険度評価法を検討している。図⑤はその一例で、システム

に格納されたボーリングデータから、理論計算によって地盤増幅度(地盤固有の揺れやすさ)の分布を求めたものである。図に示すように、増幅度の分布は自然の地形・地質条件(軟弱な谷底低地、硬質な台地)とよく調和している。この増幅度分布は住宅の適地誘導や耐震補強の強化地域選定など、地震防災対策の基礎資料として利用できる。

ボーリングデータベースを利用する本研究は、例示した増幅度のほかにも水理地質構造や地形・表層地質分布など、様々な地域環境特性の把握を可能とする。このような諸特性を基礎とした地域危険度評価を行うことは、環境・防災分野のみならず、県土の安全・適正な利用に関する多方面の施策立案に科学的根拠を与えるものである。[8]~[11]



図⑤ 調査地域における増幅度分布図(2Hz)

1:15~20倍, 2:10~15倍, 3:5~10倍, 4:1~5倍, 5:卓越成分なし, 縦軸・横軸は緯度・経度

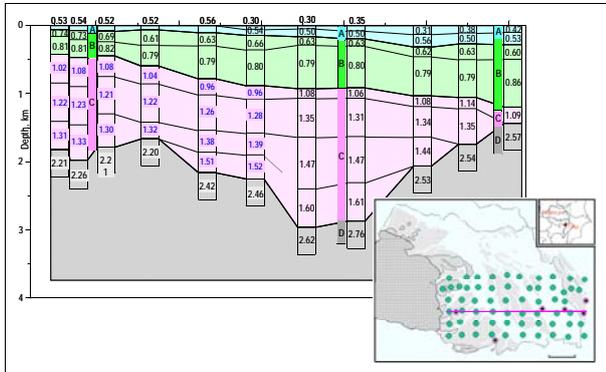
### ⑥ 微動探査法による関東平野の基盤構造調査

松岡達郎 (地質地盤・騒音担当)

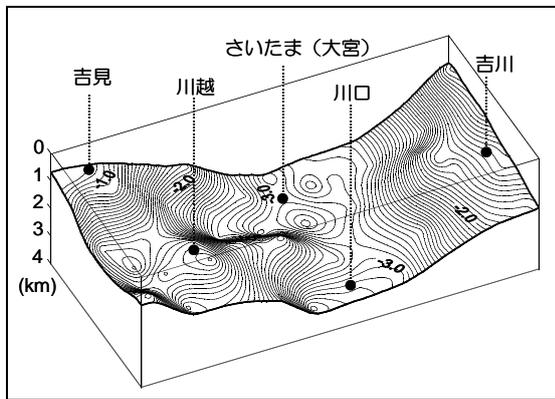
堆積平野に立地する都市の地震被害予測及び地下資源利用・環境保全対策を進めるには、平野の広域・深部に至るS波速度構造(地層の固さを表す物性値)や地質構造を解明する必要がある。本研究は、その目的に合う新しい地下構造調査法(微動探査法)を実用化し、埼玉県南部平野の詳細な2・3次元構造を推定したものである。

本研究では微動探査法による広域・高精度探査の手法を確立するために、県南全域に格子点状に配置された地点(図⑥-1)での実験及び測定・解析方法の理論的検討を行った。その結果、各地点で平野の基盤に達するS波速度構造が得られた(最大深度3.4km)。その構造は深層ボーリングの地質構造ともよく一致し(図⑥-1)、広域的な3次元構造の推定にも利用できる(図⑥-2に基盤形状を例示)。

本研究で提案された広域・高精度探査法は平野の地下構造調査法として一般化されることが期待できる。また県南全域で得られた詳細な地下構造情報は、本県の地震被害想定・耐震設計(防災分野)及び地下水利用の適正化・汚染予測(環境分野)の重要な基礎資料となる。[12]~14]



図⑥-1 地下構造探査地点と推定断面例



図⑥-2 基盤の3次元形状

### ⑦ 地域地震動特性解析に関する研究

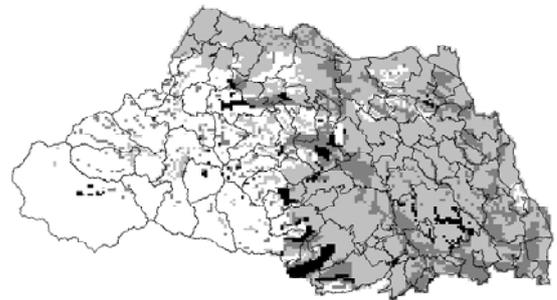
白石英孝 (地質地盤・騒音担当)

地表地震動を決定する要因は、基盤への入射地震動及び地下構造に由来する地盤の地震応答特性である。このうち、入射地震動は震源からの距離等に依存するが、地震応答特性は地盤固有の性質を強く反映したものとなる。したがって、地下構造ごとの地震応答特性(増幅度)を知ることが、地域の地震に対する潜在的な危険度を推定することができる。本研究は、こうした観点から、防災を考える上での基礎資料を得ることを目的として実施されたものである。

本研究では、県の地震被害想定調査に使用された241種類の地盤の速度構造モデル(全県、約15,000メッシュに適用)および地震波入射時の地表地震動推計値を基礎データとして用いた。一般に地盤の増幅度特性の推計には、地震時に発生する地盤の非線形性を考慮した「等価線形化法」が用いられている。これは、地震動の時間経過に伴って変化する歪とそれに対応する材料特性(剛性、減衰)を反復計算によって逐次改良し、非線形増幅度特性を算出

するものである。この場合、同一地盤でも地震の発生形態(プレート境界型、活断層型)や入射最大振幅によって異なる地震応答特性となる。本研究では、等価線形化法で得られた入射最大振幅10、100、200、300、400gal時の非線形増幅度特性を用い、ホワイトノイズが入射した際に地表で1,000galとなる場合の地盤の増幅度特性を計算によって求め、その結果を用いて地域ごとの違いを表すこととした。

図⑦は算出されたプレート境界型地震の最大増幅度の値を用いて、メッシュごとの増幅度を示したものである。図中の色は濃くなるに従って増幅度が増加する。図の傾向として台地に切れ込む谷や低地などで高い増幅度をもつことが示されている。こうした試算は地域の防災対策を検討する際に有効な資料になると考えられる。[15]

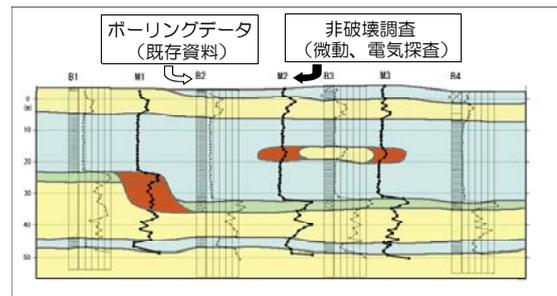


図⑦ プレート境界型地震による増幅度分布

### ⑧ 浅層地盤の微細構造探査手法の構築

八戸昭一、佐坂公規、白石英孝、松岡達郎 (地質地盤・騒音担当)

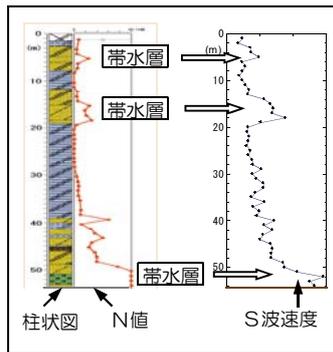
地下水汚染被害の拡大を防ぐためには、汚染範囲を迅速に推定することが重要である。この場合、ボーリングデータから帯水層分布を把握することが基本となるが、一般には既存データが不足するため何らかの補完的な調査が必要となる。その調査には非破壊的な手法が望ましく、また詳細な構造推定が可能であることが求められる(図⑧-1)。本研究は、特に地下水汚染が頻発する浅層地盤(深度50m程度)を対象に、微動探査法と電気探査法を有機的に組み合わせてボーリングデータを補完し、帯水層の詳細な2・3次元構造を把握する方法を構築するものである。



図⑧-1 比破壊調査によるボーリングデータの補完

本研究では、特に深部構造調査(深度3,000m以上)の実用化に成功した微動探査法(課題⑥、参照)を、浅層微細構造探査手法として確立する方法を検討する。そのために、浅層構造に適した新しい探査理論の構築、専用観測システムの開発(民間との共同開発)を行う。また、微動探査法と電気探査法の地下イメージ(S波速度構造、比抵抗断面)を用いた総合的な解釈法を検討する。

これまでに探査理論(観測法、構造解析法)の基礎的検討を行い、地下構造(地質柱状図、N値)が既知の地点で試験探査した。その結果、新しい微動探査法で得られる地下イメージ(S波速度の連続分布)によって、帯水層の位置が明瞭に推定できることが確認された(図⑧-2)。今後のシステム開発と探査方法の確立が実現すれば、地下水汚染調査のみならず、地震防災・土木分野など広範囲の地盤調査に適用できる。[16]~[18]



図⑧-2 試験探査の結果

## 5 研究業績

- 1) M. Takahashi, S. Hachinohe, K. Sasaka, M. Nagamori and K. Kawamura(2002)Source Survey of the Groundwater Pollution Caused by Inappropriate Management of Harmful Chemical Substances, 第四回中日環境保護技術検討会(中国・北京市).
- 2) 佐坂公規, 八戸昭一, 高橋基之, 白石英孝, 松岡達郎(2002)埋立地層における非破壊探査の可能性—電気探査の適用性について—, 第8回地下水・土壌汚染とその防止対策に関する研究会第八回講演集, 41-44.
- 3) 河村茂樹, 西田道夫, 佐坂公規, 八戸昭一, 高橋基之(2003)土壌・地下水汚染調査における物理探査の適用性(その1)—工場跡地における物理探査—, 物理探査学会第108回学術講演会論文集, 181-184.
- 4) 佐坂公規(2005)模型地盤を用いた電気探査法の環境調査への適用方法に関する研究, 環境科学国際センター報 第5号, 148-150.
- 5) 石山高, 高橋基之, 鈴木幸治, 古庄義明(2004)水銀膜微小電極を用いたストリップングボルタンメトリーによる土壤中亜鉛, カドミウム, 銅及び鉛の簡易迅速定量, 水環境学会誌, **27**, 715-720.
- 6) 石山高, 高橋基之, 古庄義明, 鈴木幸治(2004)ストリップングボルタンメトリーによる土壌試料中亜鉛, カドミウム, 銅及び鉛の高感度一斉分析, 第10回地下水・土壌汚染とその防止対策に関する研究会要旨集, 202-205.
- 7) 石山高, 高橋基之, 鈴木幸治, 古庄義明(2005)土壤中亜鉛, カドミウム, 銅及び鉛の簡易抽出法の開発, 第39回日本水環境学会年会要旨集, 印刷中.
- 8) S. Hachinohe(2004)An example of Geotechnical Information System by Saitama Prefecture, Japan, Proceedings of the Twelfth Asian Regional Conf. on Soil Mechanics & Geotechnical Engineering, Vol. 2, 1469-1473.
- 9) K. Sasaka, S. Hachinohe, H. Shiraishi and T. Matsuoka(2001)A Database of Drilling Logs for the Saitama Prefecture and Analysis of Regional Characteristics, Abst. of Fifth International Conference on Geomorphology, pp.208 (Tokyo, Japan).
- 10) 鈴木将人, 鈴木隆介, 八戸昭一(2003)大宮台地開析谷の谷底低地堆積物とその地形工学的意義, 日本地形学連合2003年春季大会, 地形, 348.
- 11) 八戸昭一, 松岡達郎, 白石英孝(2003)高密度ボーリングデータに基づく地盤増幅度解析の試み, 日本地形学連合2003年春季大会, 地形, 349.
- 12) 松岡達郎, 白石英孝, 梅沢夏実(2000)深部地下構造推定のための微動探査法の適用方法に関する検討—深層ボーリング資料を利用した位相速度の逆解析—, 物理探査, **53**, 12-28.
- 13) 松岡達郎, 白石英孝(2002)関東平野の深部地下構造の精査を目的とした微動探査法の適用性—埼玉県南部地域の3次元S波速度構造の推定—, 物理探査, **55**, 127-143.
- 14) Matsuoka T., Shiraishi H. and Hachinohe S.(2003)Estimation of three-dimensional S-wave velocity structure using microtremor array observations in the central Kanto Plain, Japan: Proceedings of 6th SEGJ International Symposium - Imaging Technology -, 429-436.
- 15) 白石英孝(2002)地域地震動特性解析に関する研究, 埼玉県環境科学国際センター報 第3号, 136-141.
- 16) S.Hachinohe, H.Shiraishi, T.Matsuoka, M. Nakamura (2004) Exploration of Precise Subsurface Structures for Estimating Aquifers using Microtremor Survey Method, Proceeding of the Fifteenth Southeast Asian Geotechnical Conference, Vol.1, 969-974.
- 17) 八戸昭一, 白石英孝, 松岡達郎, 岡田広(2003)浅層微細構造推定を目的とした微動探査法の適用性, 物理探査学会第109回学術講演会論文集, 191-194.
- 18) 白石英孝, 松岡達郎(2005)Lambの問題に基づくレーリー波複素コヒーレンス関数の離散定式とその応用—空間自己相関法の新しい解釈—, 物理探査, **58**, 印刷中.