

## 6 研究活動報告

### 6.1 総合報告

微動探査法の実用化研究 ..... 松岡達郎

### 6.2 資料

臭素系難燃加工剤(ポリブロモジフェニルエーテル)による県内河川底質の汚染実態 .....  
..... 細野繁雄、蓑毛康太郎、大塚宜寿、茂木守、杉崎三男

[総合報告]

## 微動探査法の実用化研究

松岡達郎

### 要 旨

埼玉県環境科学国際センターでは、微動探査法と呼ばれる新しい地下構造調査技術について、その実用化のための研究を長年行ってきた。微動探査法は、人工震源を使用する従来の反射法・屈折法地震探査と異なり、地球上のどこでも観測できる微動という非制御の自然波動を利用する。そのため、都市や環境配慮が必要な地域など、従来の地震探査法の実施が困難あるいは不可能な場所では、微動探査法に勝るものはない。センターが行ってきた研究の成果は、微動探査法の実用化に相応に貢献した。本報告は、15年間に及ぶ研究の経緯と成果を整理し、その概要を紹介するものである。

キーワード：微動探査法、地下構造調査技術、実用化研究、人工震源、自然波動

### 1 はじめに

土壌・地下水汚染や自然由来の重金属汚染など、近年、地盤に係わる環境問題が注目されるようになってきた。しかし、明治初期の足尾銅山の鉱毒排水や、明治中期から始まり昭和40年代にピークを迎えた地盤沈下現象など、地盤環境の問題は古くから存在している。このような過去から現在に至る汚染・自然破壊の問題だけでなく、最近では、地中熱利用やCO<sub>2</sub>地中貯留など、将来的な地球温暖化対策の場として、地盤環境分野は注目を集めている。

上述のような汚染対策や温暖化対策を確実に実現するためには、地下の地質や物性に関する情報が必要となる。たとえば、地下水汚染対策には浅層（深度100m程度まで）の帯水層の情報が有効である。またCO<sub>2</sub>地中貯留では、効率や安全性の面からCO<sub>2</sub>を超臨界流体として貯留できる帯水層（深度800m以深、温度35℃以上）が想定されるため、中深度の地質構造の把握が必要である。さらに、環境問題とも密接に関連する地震防災分野では、深刻な課題となり始めた長周期地震動被害（高層ビルの損壊など）の予測・対策のために、深度3000～4000m程度までの深部構造（S波速度構造）情報が必要となる。

ボーリング調査は地下構造情報を取得するための最も確実性の高い方法である。しかし、掘削を必要とするため、調査深度が深くなるにつれて経済性・効率性が大幅に低下

する（深度3000mでは、数億円の経費と1年に及ぶ調査期間が掛かる）。一方、地下構造調査のもう一つの手法である物理探査は、非破壊的に物性構造を推定する技術であるため、ボーリング調査より適用性が広い。ただし、地下資源開発や地震防災など広い分野で利用されている地震探査（反射法、屈折法）などは、人工震源や長い測線を必要とするため、やはり探査深度が深くなるほど経済性・効率性の問題が生じる。したがって、既存の調査手法では、多くの地下構造情報を取得することが困難である。

このような状況の中で、1980年代に、掘削も人工震源も必要としない新しい物理探査手法の研究が始まった<sup>1,2)</sup>。1990年代後半からは様々な適用事例の報告がなされ<sup>3,4)</sup>、ここ数年ではほぼ実用技術の域に到達した。これによって、将来的に低コスト・高効率に地下構造情報が取得できるものと考えられる。この技術は微動探査法（あるいは微動アレー探査）と呼ばれるもので、その基礎理論の提案から実用化研究に至るまで、ほとんどが日本国内で行われた。従来の物理探査手法は全て欧米で開発されたものであるため、この微動探査法は唯一の国産技術である。

埼玉県環境科学国際センターでは、旧公害センター時代も含めて15年間、微動探査法の研究を行ってきた。このような長年に渡るセンターの研究の成果は、微動探査法の実用化に大きく貢献したものと考えられる。本稿では、本研究の流れと成果についてその概要を報告するものである。



## 2 微動探査法とは

ここでは微動探査法の理解を得るために、全体イメージを示した後に、その基本原理と地下構造推定の方法を説明し、実際の探査事例を紹介する。

### 2.1 微動探査法の概念

図1は、微動探査法による地下構造推定の仕組みを、ごく簡単にイメージ的に示したものである。

地球上のどこでも、地表面は極めて微弱な振幅で絶えず揺れている。この揺れは、道路交通などの人間活動(都市ノイズ)や海洋波浪などの自然現象に由来するもので、これらを総称して微動と呼んでいる。微動を引き起こす弾性波には、実体波(P波、S波)と表面波(レイリー波、ラブ波)が混在しているが、通常は表面波が優勢に含まれている。

この表面波には、波動の伝搬性に関して、実体波にはない特殊な性質がある。それは「位相速度の分散」と呼ばれるもので、図1に示すように、波を構成する成分(周波数あるいは波長)ごとに伝搬速度(位相速度)が異なる現象である。これをグラフにしたものが分散曲線で、一般に周波数が低くなる(波長が長くなる)ほど、位相速度が速くなる傾向を示す。さらに、その傾向は地下のS波速度構造の違いによって明瞭に異なる。

微動探査法はこのような表面波の性質を利用して、微動の観測から表面波の位相速度を検出し、その分散を引き起こす地下のS波速度構造を推定する技術である。

### 2.2 基本原理

微動探査法の最も重要かつ基本的な作業は、表面波の位相速度検出(分散特性把握)である。微動のような不特定振源の波動から位相速度を検出する画期的な手法は、今から50年以上も前に日本人(Aki)によって提案された<sup>5)</sup>。

微動は観測場に到来する波面の方向や振幅が時間とともに不規則に変化するため、Akiはこれを定常確率過程として取り扱い、表面波の位相速度を検出するための基礎理論を導いた<sup>5)</sup>。波動現象を確率論を基に理論化する方法は当時ほとんど注目されなかったため、冒頭に述べたように、微動探査法の本格的な研究が開始されたのは1980年代になってからである。このように、微動探査法の基本原理である位相速度検出理論はやや難解なものであるため、ここでは前述の「微動探査法の概念」と同様に簡単な説明にとどめる。

図2は、位相速度検出の仕組みを簡単に示したものである。この理論では、複数の不特定振源からの波動を観測する方法として、円の中心点と円周上に等間隔配置された点で構成される観測網(円形アレー)が用いられる。全地点同時観測された時間波形データを基に、図に示した手順で位相速度を計算する。すなわち、はじめに中心点と各円周点の間で波形の相関性(空間自己相関関数)を計算し(a)、その全周平均値(空間自己相関係数)がベッセル関数の値に等しくなること(b)を利用して、関数の引数に含まれる位相速度を逆演算によって求める(c)。

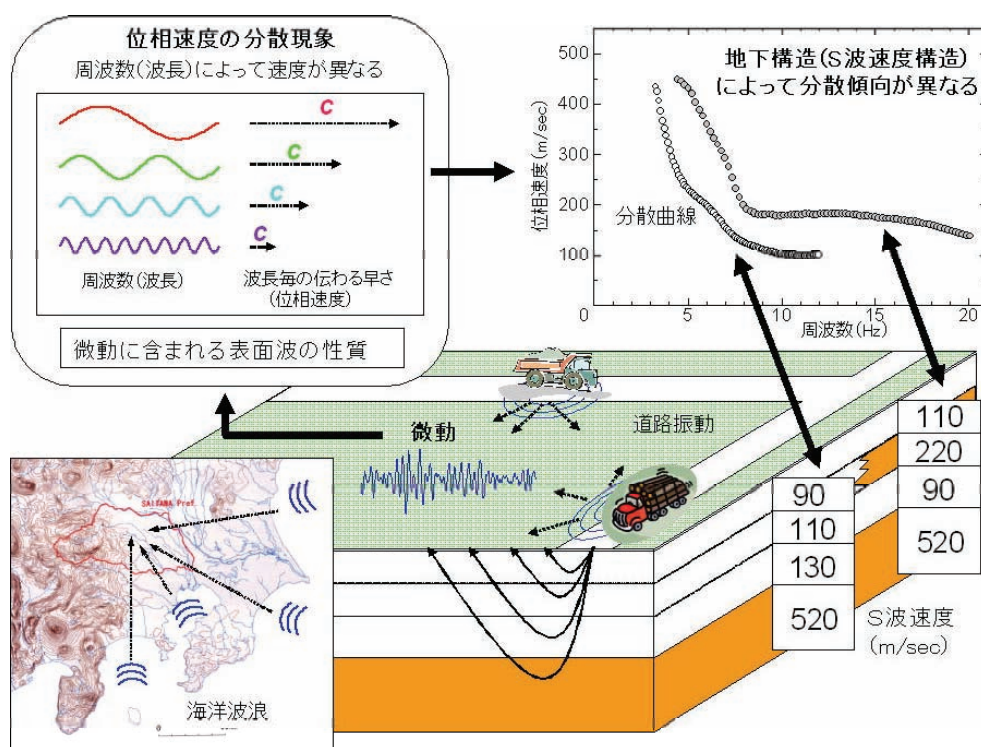


図1 微動探査法の概念

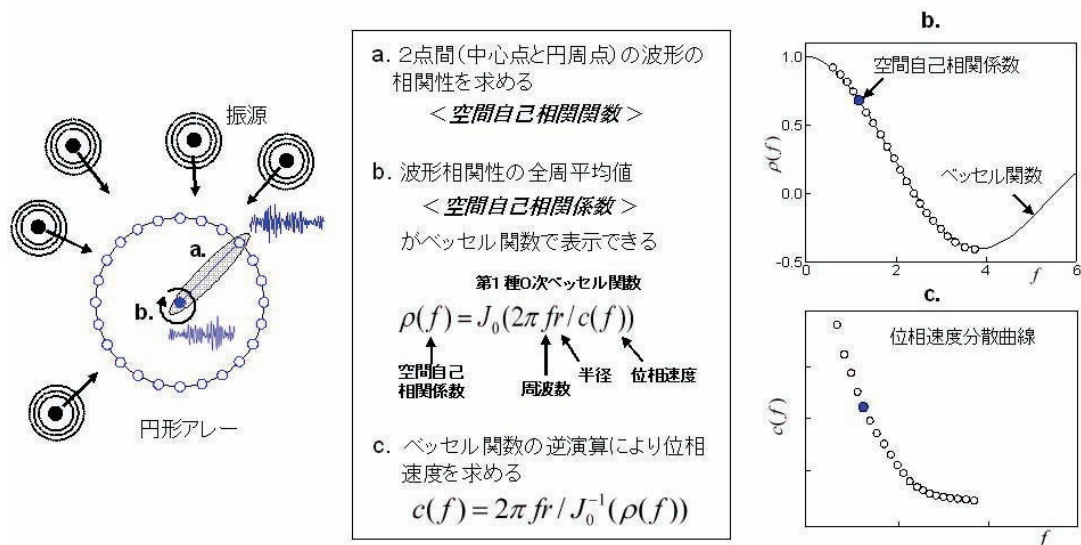


図2 位相速度検出の仕組み

この手法は、空間自己相関法(Spatial AutoCorrelation Method; SPAC法)と呼ばれるもので、Akiの基礎理論<sup>5)</sup>を基に、1990年代になってからようやく実用手法が構築された<sup>6,7,8)</sup>。

図3は、実際にアレー観測で得られた位相速度の分散を例示したものである。現在、実用的に使用されている円形アレーは、図のような中心点と円周3点の正三角形アレーである。アレーサイズ(半径)は探査深度及び地下構造によって異なるほか、必要に応じて複数のアレーを組み合わせる場合もある。なお、検出される表面波の種類は、上下動観測のみで簡便に検出できるレイリー波が現時点では主流である。

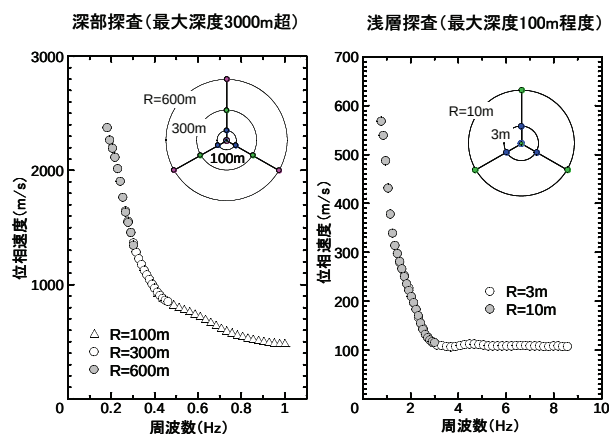


図3 微動アレー観測による位相速度検出例

## 2.3 地下構造推定の方法

表面波の位相速度の分散は観測で得られるだけでなく、地下の速度構造モデル(パラメータ:密度 $\rho$ 、P波速度 $V_p$ 、S波速度 $V_s$ 、層厚 $H$ )から計算することができる(前者を観測分散、後者を理論分散と呼ぶ)。微動探査法の地下構造推

定は観測分散から速度構造モデルを求めるものであるが、このようにある現象(出力)からその原因(入力)を推定することを逆問題の解析(逆解析)という。

図4は微動探査法の逆解析をイメージ的に表したものであるが、地下を水平成層構造であると仮定して、適当な初期モデルを基に観測分散に適合する理論分散を持つモデル(最適モデル)を最適化法によって探索する。その際、モデルのパラメータの中で $V_s$ と $H$ が位相速度の変化に大きく影響するため( $\rho$ 及び $V_p$ の10~100倍程度)、これらを探索対象(変数パラメータ)とする。これによって、微動探査法で推定される地下構造はS波速度構造になる。

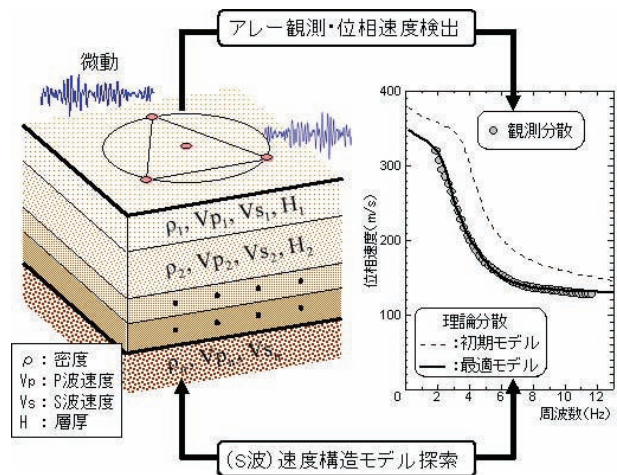


図4 微動探査法の地下構造推定

図5は、都市部の高層ビルが林立する一角で行った微動探査の逆解析結果(S波速度構造)を例示したものである。なお、観測分散と逆解析で得られた最適モデルの理論分散は、図4に示されたものである。この探査では、図5に示すように、近傍のボーリング資料(柱状図)と良好に調和す

るS波速度構造が求められているほか、ボーリング資料がない深さの構造も推定されている。この地点では、さらに深い構造(深度300m)も得られており、高層建築物の耐震設計などに必要なS波速度構造情報が高い精度で求められている。

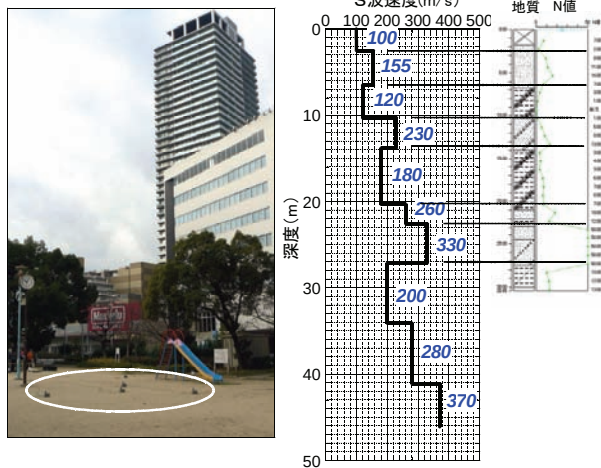


図5 微動探査の逆解析結果(S波速度構造)

この探査事例に示したように、微動探査法は現在、ほぼ実用的な地下構造調査技術となり、土木・建築、地震防災分野を中心として様々な適用が広がりつつある。

センターでは1994年から2008年にかけて、微動探査法の実用化を想定した様々な研究を行った。それらは以下に示すように3課題に大別される。次章から、これら各研究の概要を紹介する。

- 空間自己相関法の適用性に関する研究
- 深部地下構造探査に関する研究
- 浅層地下構造探査に関する研究

### 3 空間自己相関法の適用性に関する研究

この研究を始めた背景として、我が国での位相速度検出に関する研究の簡単な経緯と、センターがこの研究を始める動機となった実用化の課題を述べ、その後に課題解決のために行った研究について成果の概要を紹介する。

#### 3.1 研究の背景

微動観測から地下構造を推定しようとする研究が活発化し始めたのは、実は1970年代からである。しかし、その当時はAkiの独創的な理論<sup>5)</sup>が十分理解されなかった可能性があり、円形ではなく十字型のアレーを基に波の到来方向を判断した上で位相差を求める研究が主流であった<sup>9,10)</sup>。したがって、本来の微動の特徴である不特定振源に対応することが困難で、位相速度分散を安定して求めることができなかった。

Akiの理論<sup>5)</sup>が実際の地下構造調査に初めて適用されたのは、岡田・坂尻によるものである<sup>1)</sup>。その後、北海道大学理学部地球科学研究室(岡田廣教授)が中心となって微動探査法の実用化の基礎研究が始まった。正三角形アレーの提案や基礎理論の改良<sup>2)</sup>、十勝平野の深部構造探査<sup>11)</sup>などにより、空間自己相関法が分散の観測に有効であることが示された。

微動探査法に興味を持ち始めた筆者は、Akiの理論<sup>5)</sup>のほか北大の研究成果を詳細に検討し、当時の位相速度検出に関して以下の課題があることを見いだした。

- ① 計算手法の効率性と精度が低いこと
- ② S波速度構造との対応性が検証されていないこと

これらの課題の解決のために、理論と実験を組み合わせた研究を1994年から開始し、次に示す成果を得た。

#### 3.2 研究成果の概要

##### 3.2.1 位相速度検出の高速・高精度化

空間自己相関法の位相速度検出は図2に示した3段階の手順であるが、最も重要な作業は「a. 2点間の波形の相関性を求める」ことである。これは、観測波形データを基に成分(周波数)ごとの相関係数を計算するもので、その計算精度が直接位相速度の値に影響を与えるからである。

Akiはこの計算のために、共鳴型フィルタと乗算回路で構成されるアナログ分析装置を作成し、成分ごとの波形(成分波)データの抽出と相関演算を行っている<sup>5)</sup>。また、岡田・坂尻<sup>1)</sup>以降は、デジタルバンドパスフィルタで作成された成分波を基にデジタル演算で相関係数を求めていた。しかし、これらの方法はいずれも観測記録からフィルタで成分波を作成し、各成分波について時間領域の演算を行うものであるため、成分波作成時の誤差や時間領域演算の効率性の問題(計算時間が膨大になる)があった。

本研究では、はじめに「成分波ごとの時間領域演算」に比べて圧倒的な高速化・高精度化が期待される「観測記録の周波数領域による一括演算」を実現するために、以下のような「空間自己相関法における2点間の相関性」の新しい定式化を行った<sup>8)</sup>。

$$\gamma_{xy}(f, \theta; r) = \frac{\text{Re}[S_{xy}(f, \theta; r)]}{\sqrt{S_x(f) \cdot S_{yy}(f, \theta; r)}}$$

これは、円形アレーの中心点  $x(0,0)$  と円周点  $y(r, \theta)$  (極座標表示) の観測波形のパワースペクトル密度関数  $S_x(f)$ 、 $S_{yy}(f, \theta; r)$  及び2点間のクロスパワースペクトル密度関数  $S_{xy}(f, \theta; r)$  で表現される複素コヒーレンス関数の実部である。この式を利用することにより、観測波形データから成分波を作成することなく、直ちに高速フーリエ変換(FFT)により周波数領域で一気に計算することができるようになった。

本研究ではこのような理論的な成果だけでなく、新しい定式を用いた位相速度検出ソフトウェアも開発した<sup>12)</sup>。図6



は、このソフトウェアの作業画面の一部を例示したものである。これにより、位相速度検出(分散曲線作成)の効率性及び精度が大幅に向上し、空間自己相関法の実用化に寄与できたものと考えられる。

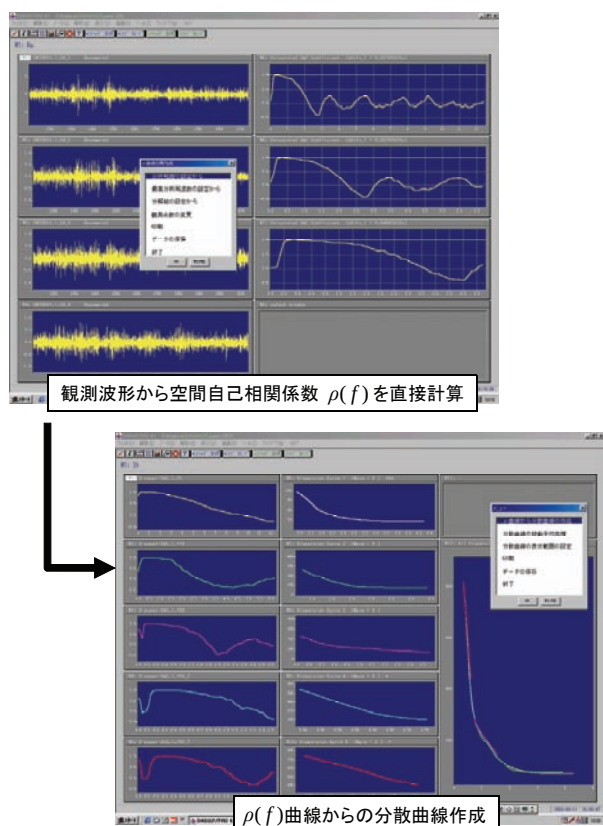


図6 位相速度検出ソフトウェア

### 3. 2. 2 位相速度観測分散の検証

微動探査法の地下構造推定(逆解析)では、観測分散がレイリー波の基本モードであると仮定している。これは、レイリー波(表面波)には基本モードのほか複数の高次モードが含まれているが、地震波の観測などから通常は基本モードが優勢になることが知られているためである。空間自己相関法の理論はこの基本モードのみ(単一モード)であることを前提に構築されたものである。しかし、これはあくまでも仮定であり、観測分散がレイリー波基本モードであることを検証する必要がある。

本研究でこの検証を課題の一つとしたのは、当時、観測分散がレイリー波基本モードであることを実証する研究がほとんど行われていなかったためである。そこで、ボーリング調査及びPS検層などにより速度構造が既知の地盤(深度15~50m程度の浅層構造、深度3000m程度の深部構造)で空間自己相関法による観測分散を求め、既知の速度構造モデルで計算したレイリー波基本モードの理論分散と対比した<sup>8)</sup>。

図7は全地点の観測分散と理論分散を示したものである。図から明らかに、浅層構造及び深部構造とも、観測分

散と理論分散は極めて良好に調和している。これにより、空間自己相関法による位相速度検出の信頼性が十分高いことが実証され、実用化研究の進展に寄与できたと考えられる。なお、本研究では、精度検証だけでなく、このような実験成果を基に、空間自己相関法の観測・解析誤差の原因解明と高精度な観測・解析手法の提案など、実用手法の構築の基礎となる成果が得られた。

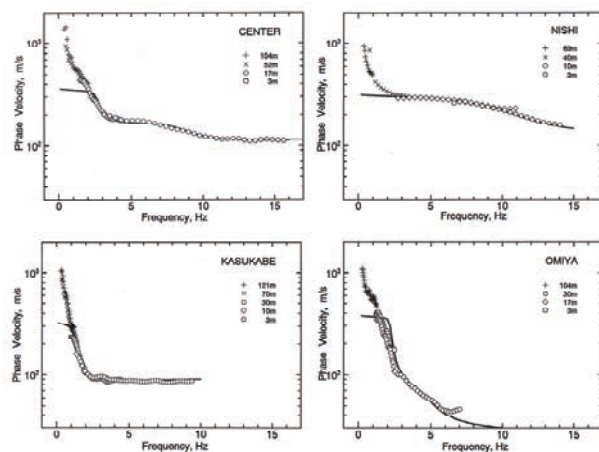


Fig. 5 Observed phase velocities at each site; symbols show the different seismometer spacings. Theoretical phase velocities of the fundamental-mode Rayleigh waves calculated for the structure models shown in Table 1 are also plotted by a solid line.

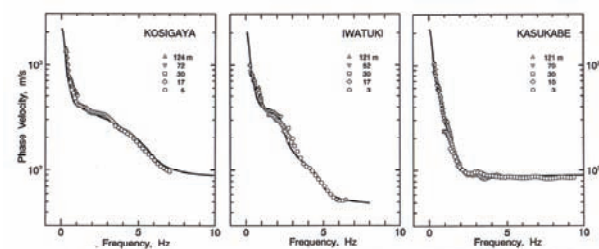


Fig. 10 Phase velocities obtained by the all arrays at IWATUKI, KOSIGAYA and KASUKABE sites; symbols show the different seismometer spacing. Theoretical phase velocities of the fundamental-mode Rayleigh waves are also plotted by a solid line.

図7 観測分散と理論分散の対比<sup>8)</sup>

## 4 深部地下構造探査に関する研究

前述の研究成果を含めて1990年代後半には、学会全体の流れとして、アレー観測と位相速度検出に関する実用化研究がほぼ完了に近い状況になった。そして、この前後から具体的な探査への応用研究が活発になってきた。その対象は、場所によっては深度3000mを越えるような大深度のS波速度構造推定である。ここでは、はじめに深部構造探査への応用研究が始まった理由を簡単に述べ、センターが取り組んだ研究の概要を説明する。

### 4. 1 研究の背景

#### 4. 1. 1 深部S波速度構造調査の必要性

日本の大都市圏のほとんどは関東平野、濃尾平野、大阪平野などの堆積平野に位置する。このような地形では、硬い岩盤の上に軟らかい堆積層が厚く存在しているため、

地震時に岩盤から入射してきた波動が大きく増幅され、地表の地震動が極めて強くなる。したがって、これらの地域では激甚な地震災害が繰り返し引き起こされてきた。

地震災害の軽減のためには、地表地震動の大きさ(震度)を地域ごとに正確に予測し、震度に応じた被害推定を行ったうえで事前の対策を行うが必要になる。この地震動予測シミュレーションには、地表付近から硬い岩盤(地震基盤)までの速度構造モデルが用いられるため、対象地域の速度構造資料を揃えることが望ましい。その際に、地震の最大主要動となる横揺れの予測精度向上のためには、S波速度の実測データが重要となる。

#### 4. 1. 2 既存技術の問題点

地下の速度構造を調査する手法としては、屈折法及び反射法地震探査が最も代表的なものである。これら地震探査法は19世紀後半から研究が進み、20世紀初頭にはすでに油田開発などの地下資源分野で数多く適用されるようになった。現在では、土木など幅広い分野にも利用されている技術である。

地震防災分野に地震探査法が適用されるようになったのは、たとえば関東平野の場合、1970年代からである。初期の頃は屈折法が主に利用され、特に、東京湾岸の夢の島で膨大な量のダイナマイトを爆破させて行った「夢の島人工地震実験」が代表的なものである<sup>13,14)</sup>。図8は、「夢の島」以降の屈折法探査も併せてまとめられた発破点・観測点(左)及び推定基盤深度分布(右)である<sup>15)</sup>。しかし、当時のこの手法では厚い堆積層構造を2、3層にしか区別することができず、精度の高い構造推定ができなかった。

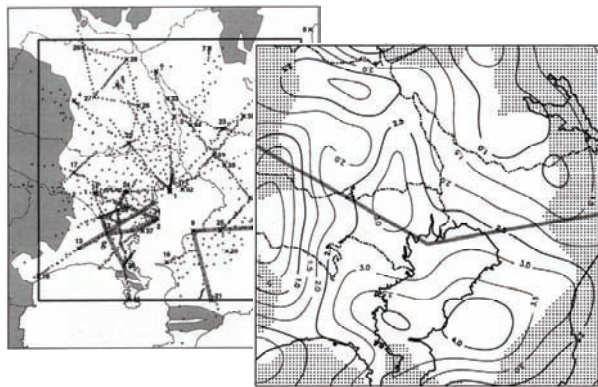


図8 関東平野における屈折法地震探査<sup>15)</sup>

このような状況を背景として、1990年代になると、より詳細な地下構造が推定できる反射法が主に利用されるようになった。図9は、その一例として、下総地殻活動観測井の周辺で行われた探査結果<sup>16)</sup>を例示したものである。反射法の場合、図に示すように、地震基盤までの構造をかなり細かく把握することができる。

しかしながら、このような反射法(及び屈折法)には、その手法に起因する以下の問題がある。

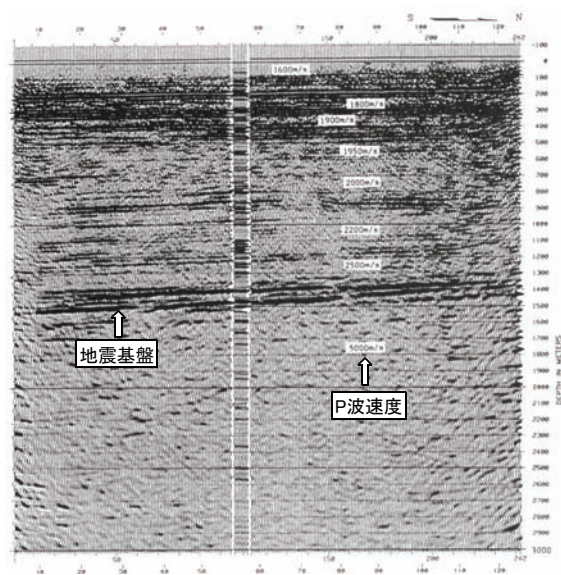


図9 反射法深度断面<sup>16)</sup>

- ①大規模な人工震源を必要とするため、住宅密集地など都市部での適用が困難であること  
(騒音・振動の発生による環境問題)
- ②通常使用される人工震源からはP波速度構造が解析されるため、最も重要なS波速度構造が得られないこと  
(深部探査用のS波震源が実用化されていない)

また、このような問題だけでなく、探査経費も高額であるため、地震動シミュレーションに必要な情報を広域的に多数入手することに適した手法ではなかった。なお、当時、地震基盤までのS波速度構造資料は、基本的にボーリング孔を利用した探査手法(速度検層、VSPなど)によるものしかなく、深層ボーリング掘削に莫大な経費がかかることもあって、データの数も極めて少なかった(関東平野で3カ所)。

#### 4. 1. 3 微動探査法の適用上の課題

微動探査法は2で述べたように、人工震源を必要とせずに位相速度の分散を観測し、地下のS波速度構造を推定することができる。微動探査法の深部S波速度構造調査への応用研究が急速に活発化したのは、このような微動探査法の特長(地震探査法の問題点を解決できる可能性があること)が目立ったためである。

センターがこの応用研究を開始する以前から、すでにいくつかの深部構造探査事例が発表されていた<sup>3,11)</sup>。しかし、当時の段階では、実用化に関する多くの課題が存在した。研究を開始するに当たって、特に筆者が重要な課題として認識したのは探査結果の精度である。すなわち、推定S波速度構造がどれだけ実際の地下構造(特に地質構造)に対応しているか(確実性)、また構造の詳細さ(層分割の細かさ)がどれだけ確保できるかを明らかにする必要があると考えた。

これは、当時行われていた深部構造探査では、推定S波



速度構造の層分割数が少なく(深度3000mの場合でも3～4層程度)、確実性の検証もほとんど行われていなかったためである。したがって、微動探査法は概略的な構造を推定する手法として位置づけられ、「概査法」と呼ばれていた。筆者は、実用化の途上にある微動探査法が将来的に高い信頼性と広い応用分野を獲得するためには、「概査法」ではなく「高精度探査法」になることが必要であると考え、以下のような研究課題を設定した。

#### ●高精度探査手法の構築

反射法や孔井利用探査(速度検層、VSP)と同程度の層分解能と精度の確保

#### ●広域・高密度探査の実現

平野部の広い地域での詳細な2・3次元構造の推定

本研究では、この二つの課題を中心に、微動探査法が「高精度探査法」として利用できることを実証しようとしたものである。以下に、各課題ごとの研究内容と成果の概要を述べる。

### 4. 2 高精度探査手法の構築

微動探査法は「アレー観測」、「位相速度検出」、「逆解析」の三つの手順でS波速度構造を推定する。探査結果の精度は、これら各手順の作業の影響を受ける。このうち、「位相速度検出」については、すでに3で述べたように、センターが高精度・高効率の検出手法を開発した。しかし、「アレー観測」については、深部構造探査に必要なアレーサイズや観測手法について、精度向上に関する検討がほとんど行われていなかった。また、「逆解析」についても、これがS波速度構造推定の精度に最も影響を与えるものであるにも関わらず、十分な研究が行われていなかった。

本研究では、深部構造探査に関する複数の実験を基に、高精度探査に必要な「アレー観測手法の構築」と「逆解析手法の検討及び精度検証」を行った。

#### 4. 2. 1 高精度アレー観測手法の構築

図10は、今回の研究でほぼ確定した深部構造探査用のアレーを例示したものである。

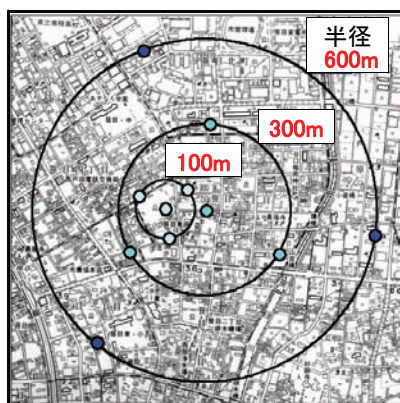


図10 深部構造探査のアレーサイズ

後の4. 2. 2で示す8カ所の既知構造地盤での実験から、図に示すような半径100m級、300m級及び600m級の3重アレーにより、深度1000m～3000m程度の深部構造探査が可能であることが確認された。これは、それまで使用されていた最大半径1400m級<sup>3)</sup>に比べて、半分以下の小さいアレーサイズである。

このアレーサイズが、実は空間的な意味での構造推定精度に影響する。微動探査法で推定される地下構造は、図4に示したように、水平成層の速度構造である。ただし、「水平成層」は平面的に無限である必要はなく、設定されたアレー範囲内の直下で成立していればよい。すなわち、微動探査法の推定構造はアレー範囲内の平均構造に相当するものである。したがって、アレーサイズが小さいほど狭い範囲の構造推定が可能になり、空間的な構造(2次元断面、3次元構造など)の推定精度が高くなる。

本研究では、このようなアレーサイズの検討だけでなく、観測手法の新しい提案も行った。図11は、本研究の深部構造探査に使用した観測システムである。深部構造探査の場合、観測地点間の距離が長くなるため、地点ごとに独立して記録できる観測システムが使用される。



図11 微動の独立観測システム

アレー観測では全地点での時間波形の同時記録が必要となるが、浅層構造探査のようにアレーサイズが極端に小さい場合は、各センサーをケーブルで一台のデジタルレコーダに接続し、その内部クロックにより全地点の同時サンプリングができる。しかし、深部構造探査での独立観測ではレコーダごとのクロック周波数の器差により、基本的に全地点での同時サンプリングができない。そのため、当時は各レコーダの内部クロックを観測前後で較正する方法が用いられていた。この方法では、較正作業に手間がかかるほか、サンプリング精度にも問題がでる可能性があった。

そこで、筆者は当時商品化され始めたGPS利用の刻時装置に着目し、その連続較正信号(精度、50  $\mu$  sec)で外部サンプリングする方法を考案した(図11の観測システム)。このシステムを既知構造地盤での実験に使用した結果、観測開始時刻及び観測時間中(1時間)のサンプリング時刻が全地点とも一致し、完全な同時観測が極めて簡単に実現できることが確認された。これにより、アレー観測の作業

の効率化及びデータ収録の高精度化に寄与できたと考えられる。実際、これ以降、微動探査法で独立観測を行う場合、このようなGPS利用のシステムが使われるようになった。

なお、高精度アレー観測手法の構築に関する研究では、これ以外に民間企業と連携して、センサー及びアンプについて

- ・観測周波数の広域化(7秒までの長周期化の実現)
- ・チャンネル間のコヒーレンスの高精度化(観測周波数範囲で0.999以上の確保)

を実現することにより、深部構造探査専用的高精度観測システムを開発することができた。冒頭にあげた、従来の半分以下のアレーサイズで深部構造探査が可能になった最も大きな要因は、この高精度システム(特に、チャンネル間コヒーレンスの向上)によるものである。

#### 4. 2. 2 高精度逆解析の検討と精度検証

「高精度アレー観測手法の構築」にめどが立った後に、構造推定の精度に最も影響する逆解析について、精度向上のための手法を検討した。すでに述べたように、当時の深部構造探査への応用研究(探査事例報告)では、逆解析で得られたS波速度構造の妥当性の検討がほとんど行われていなかった。そこで、この研究では、8カ所の深層ボーリング地点近傍での微動探査により、逆解析手法の検討と既存情報(地質構造、物理検層データなど)による探査結果の検証を行った。

##### (1) 探査地点及び既存情報の概要

図12は、探査対象とした深層ボーリング地点を示したものである。このうち、地殻活動観測井及び地震観測井(図中の1～5)は(独)防災科学技術研究所が掘削・管理しているもので、地質構造だけでなく物理検層データなどの物性値情報も公開されている。また、野田、松伏、流山井(図中の6～8)は民間企業が掘削したもので、地質構造については公開されている。



図12 探査地点

図13は関東平野の深層ボーリング地点での地質区分<sup>17)</sup>を基に、図12の各地点の概略的な地質構造を示したものである。図に示すように、各地点の基盤深度や堆積層の構造

は様々異なっている。今回の研究では、このように構造変化に対応する明確なS波速度が得られるか否かを検証することを最も重要なテーマとした。

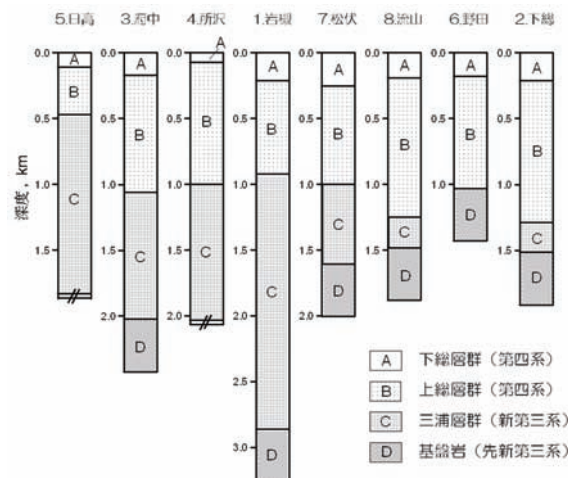


図13 各地点の概略地質構造

##### (2) アレー観測・位相速度検出

ボーリング地点近傍で、図11に示した独立観測システムにより、図10に例示した3重アレーで微動観測を行った。位相速度検出(観測分散曲線の作成)は、3. 2. 1で示した新開発のソフトウェアを用いた。

全地点で得られた観測分散曲線を図14に示す。深部構造探査の場合、表面波の周波数成分は1Hz以下が主体(長周期)となるため、基本的には図のように横軸を周期で表す。観測分散の傾向を見ると、たとえば関東山地に近く、堆積層の硬さが想定される日高では速度が速く、東京湾に近い下総では遅くなっている。したがって、得られた観測分散は地下構造の違いを反映しているものと考えられる。

そこで、実際の地下構造に正しく対応する探査結果を得るための逆解析手法を検討し、推定されたS波速度構造を地質構造などと対比して逆解析の精度検証を行った。

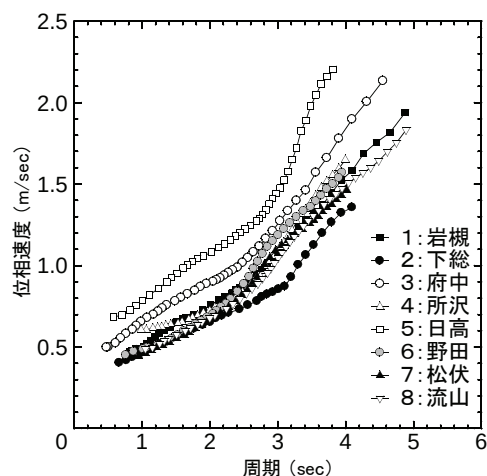


図14 各地点の観測分散曲線

### (3) 微動探査法の逆解析の問題点

微動探査法は人工震源を用いずに大深度のS波速度構造を推定できる優れた手法であるが、その構造推定(逆解析)には重要な課題がある。それは、「解の任意性」という問題で、観測分散に適合する理論分散を持つ速度構造モデルが一意に定まらないことである。

「解の任意性」の実例を図15に示した。上図は、観測分散を基に、最適化法の一つである遺伝的アルゴリズム(Genetic Algorithm: 以下、GAという)で得られる複数の解のうち、残差がほぼ等しいS波速度構造を示したものである。また、下図に各々の理論分散を観測分散と併せて示した。図から、理論分散がほぼ同一でも速度構造が異なっているのがわかる。図には、二つのモデルのみを表示しているが、実際は同一レベルの残差を持つモデルは多数存在する。これが「解の任意性」であり、残差のみでモデルの妥当性を評価できない問題である。

このような「解の任意性」が現れるのは、位相速度がモデルパラメータに対して強い非線形性を持つこと、さらにパラメータの数が多いことに起因するためである。したがって、理論的に「解の任意性」を解決する方法はなく、現実的な対応手法を構築するしかない。そこで、本研究では「解の任意性」を極力抑えとともに、実際の地下構造に調和するS波速度構造推定を実現するために、

①既存情報に基づく初期モデルの作成

②強い拘束条件(探索範囲)を基にしたGA逆解析により、探査を行った8カ所のS波速度構造を推定した。

なお、①、②の方法については、後の5. 2で具体的に説明する。

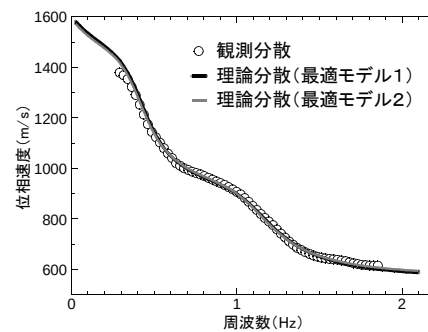
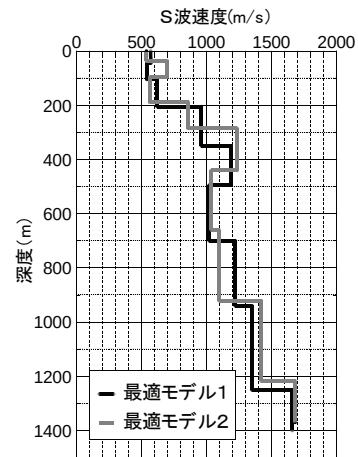


図15 「解の任意性」の実例

### (4) 逆解析結果の精度検証

各地点で得られたS波速度構造を、様々な既存情報と対比した結果を示す。

図16は、物理検層(音波、密度検層)結果と対比したものである。ちなみに、この物理検層データがある地点では、音

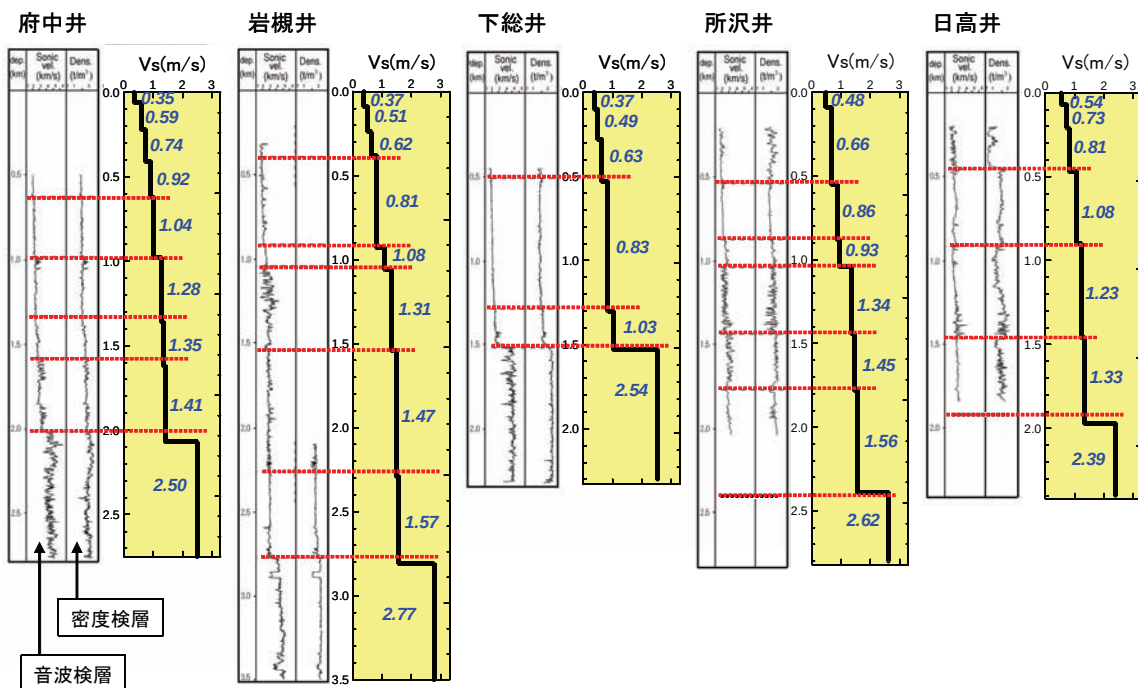


図16 物理検層(音波、密度検層)結果と推定S波速度構造との対比



波及密度の変化が起こる深度を参照して、層分割数を設定している(初期モデル)。そのため、検層データの変化に対応した層厚変化が得られている。

図17は、速度検層(一部でVSP:鉛直地震探査)から得られたS波速度構造と対比したものである。微動探査の逆解析による推定構造は、各地点とも人工震源利用の測定結果に調和している。特に従来の速度検層より分解能が遙かに高いVSPとの整合性が極めて高いことが確認された。

また、図18は全地点の地質構造と対比したものである。いずれも、地層区分と速度層が良好に対応している。特に関東山地から離れた平野中央部の地点(岩槻、松伏、流

山、野田、下総)では、地質区分に整合するだけでなく速度層の連続性が高いことも明らかになった。なお、最下層のS波速度(2.4~2.7km/sec台)が地層の対応から地震基盤に相当するものであることは明らかである。

以上の検証結果から、微動探査法でも周辺の既存情報を参照することにより、実際の地下構造に正確に対応したS波速度構造が得られることが確認された。また、層数も最大9層となり、反射法などとはほぼ同程度の分解能をもつ逆解析が可能であることが判明した。

なお、この節(4. 2)の内容は、筆者らの文献<sup>4,12,18)</sup>を参考に記述した。

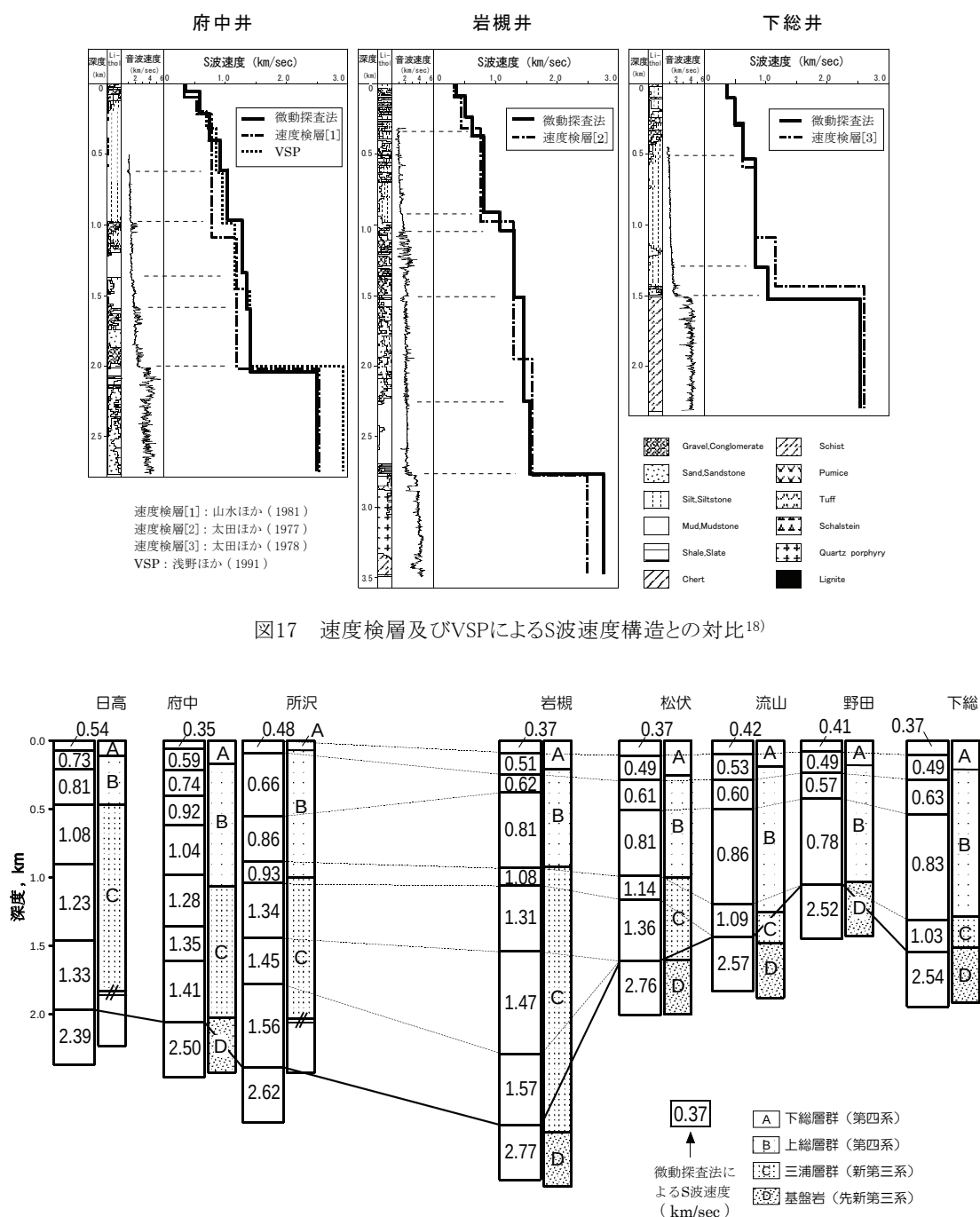


図17 速度検層及びVSPによるS波速度構造との対比<sup>18)</sup>

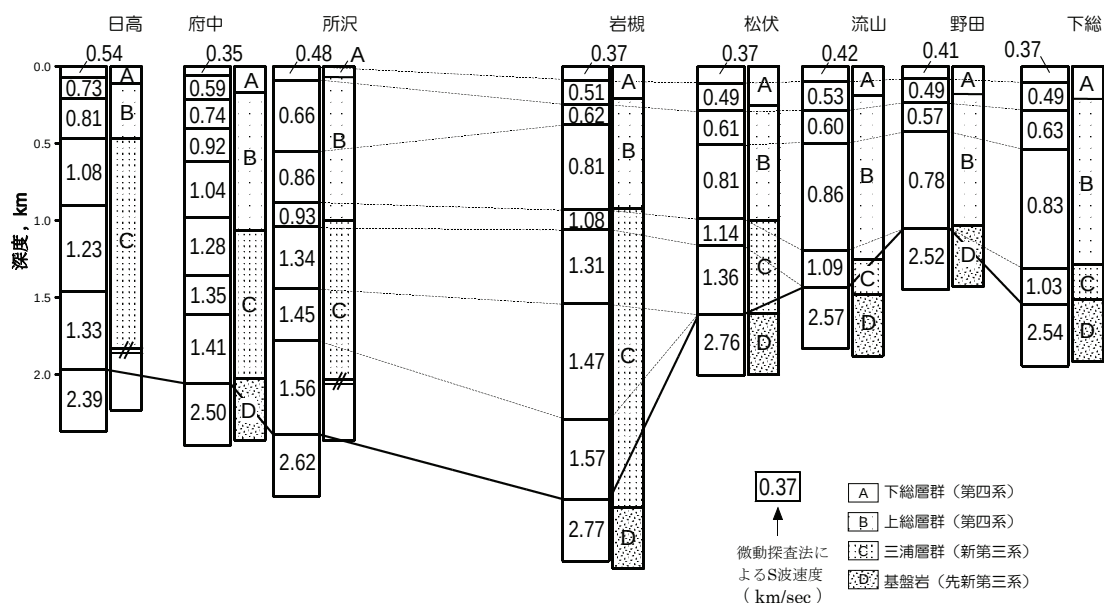


図18 地質構造との対比<sup>18)</sup>

### 4.3 広域・高密度探査の実現

4.1で述べたように、深部S波速度構造は地震動予測の精度向上のために必要である。さらに、予測対象地域でのデータ密度も精度に大きく影響する。これは、1995年の兵庫県南部地震以降、3次元シミュレーションの利用が検討されるようになったためである。

3次元シミュレーションを確実に行うには、多数のS波速度構造情報に基づく詳細な3次元構造モデルが必要となる。しかし、当時(1990年代)は、このような目的に微動探査法が使われることはほとんどなかった。そこで、本研究では、微動探査法による広域・高密度探査を実現するために、4.2で紹介した高精度・高分解能の微動探査手法を基に、埼玉県南部平野で多数の微動探査を行った。

#### 4.3.1 探査計画の概要

今回の高密度探査地点及び4.2で紹介した探査地点を図19に示した。図には、逆解析の参考にしたボーリング資

料及び地震探査結果などが存在する場所も示してある。

図に示すように、この地域では、当時一部で深層ボーリング調査や地震探査が行われていただけである。このような状況は埼玉県だけではなく関東平野、さらには世界的に地震分野の調査研究が最も進んでいる日本の国内全体に当てはまるものであった。

本研究では、広域・高密度探査の実現を図るだけでなく、人口の多い県南部地域の地震動予測の精度向上も重要な目的とした。そのために、図のように多数の探査地点を設定し(61地点)、各地点で高精度S波速度構造の推定を行うこととした。このような広い地域(南北:約30km、東西:約50km)で、高密度(標準メッシュ:5km)な微動探査が行われたのは本研究が初めてである。

以下に、筆者らの文献<sup>19-22)</sup>を参考に、研究成果の概要を紹介する。

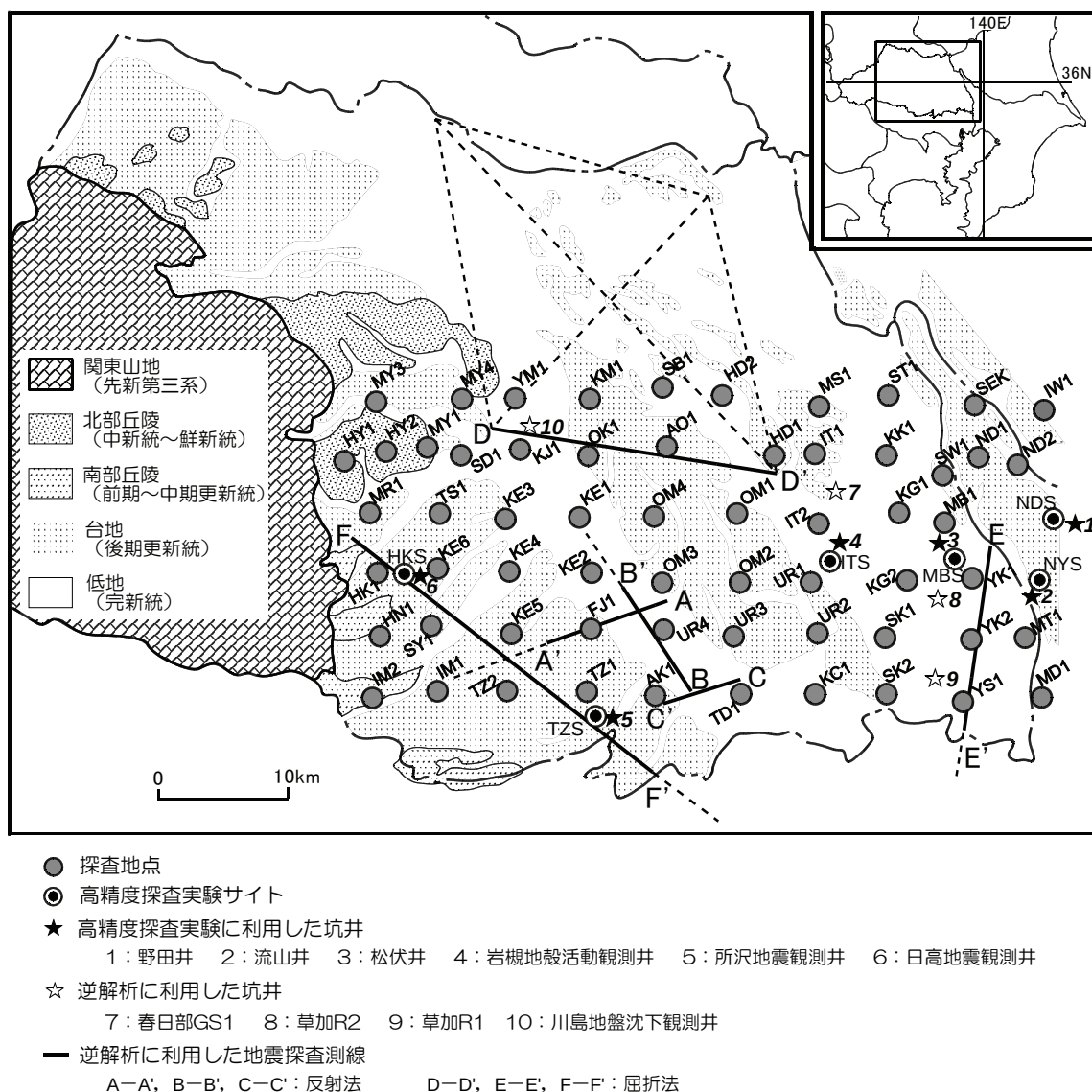


図19 広域・高密度微動探査フィールド<sup>21)</sup>

#### 4. 3. 2 高精度2次元断面の推定

はじめに、全地点で得られたS波速度構造を基に、2次元断面を作成した。図20は、探査地域中央付近の東西断面を示したものである。このライン上には複数の深層ボーリング地点があるため、その地質構造も併せて示した。なお、日高、岩槻、松伏及び流山のボーリング地点近傍のS波速度構造は、4. 2で紹介した「高精度探査手法の構築」の研究で得られたものを用いた。図に示すように、S波速度構造は地質構造とよく調和しており、各速度層の値も東西方向の長い距離にわたって、高い連続性を示している。

図から、この地域の堆積層は以下の傾向を示すことがわかる。

- ①最上層の下総層群相当層(S波速度:0.3~0.5km/sec台)は西(関東山地)から東(千葉県)に向かって、徐々に厚くなる。
- ②二番目の上総層群相当層(S波速度:0.6~0.8km/sec台)も同様な傾向を示すが、日高付近の丘陵地から急速に層厚が増加する。
- ③最も下の堆積層である三浦層群に相当する層(S波速

度:0.9~1.6km/sec台)は基盤相当層(S波速度:2.2~2.7km/sec台)の深さに応じて、複雑な層厚変化となる。

- ④基盤相当層の深度は中央付近が最も深い谷の形状を示す。

これらの傾向は、ボーリング資料などから地質学的に解釈されている関東盆地の堆積層構造に調和している。したがって、微動探査で推定された断面は相応の精度を持つものと考えられる。

図21に、探査地域の東西断面をすべて示した。各断面とも①~④の傾向が共通しており、地域全体についても良好な探査結果が得られた可能性が高いものと考えられる。一方、各断面を詳細に見ると、上述のように全体傾向は似ているが、特に基盤相当層の深度が地域によって異なる傾向を示している。特に、中央の谷の西側では深度が単純に浅くなる地域や途中から深くなる傾向を示す地域がある。

このような地下構造の変化をより詳細に把握するために、3次元構造の推定を行った。

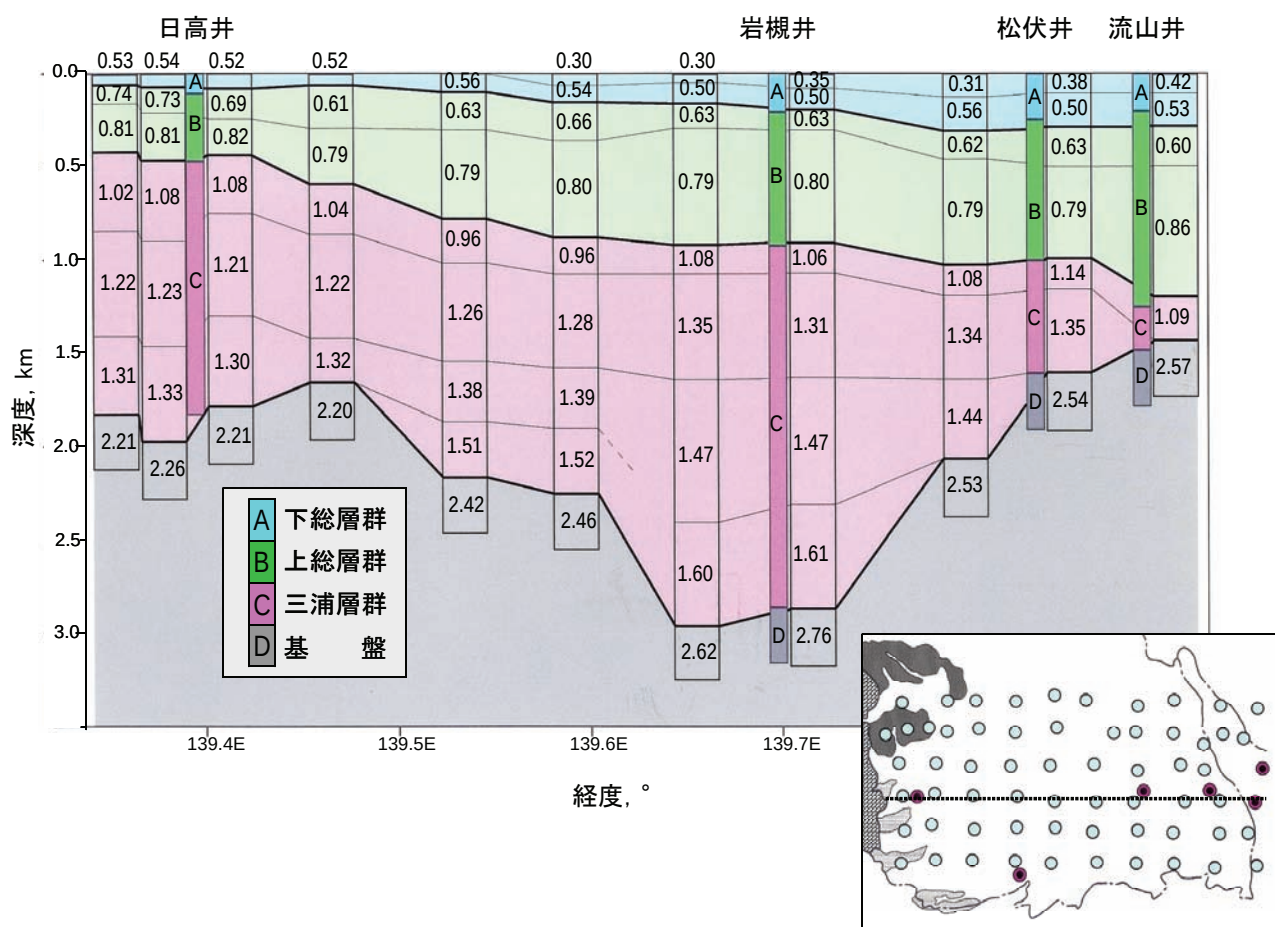


図20 東西方向のS波速度断面例



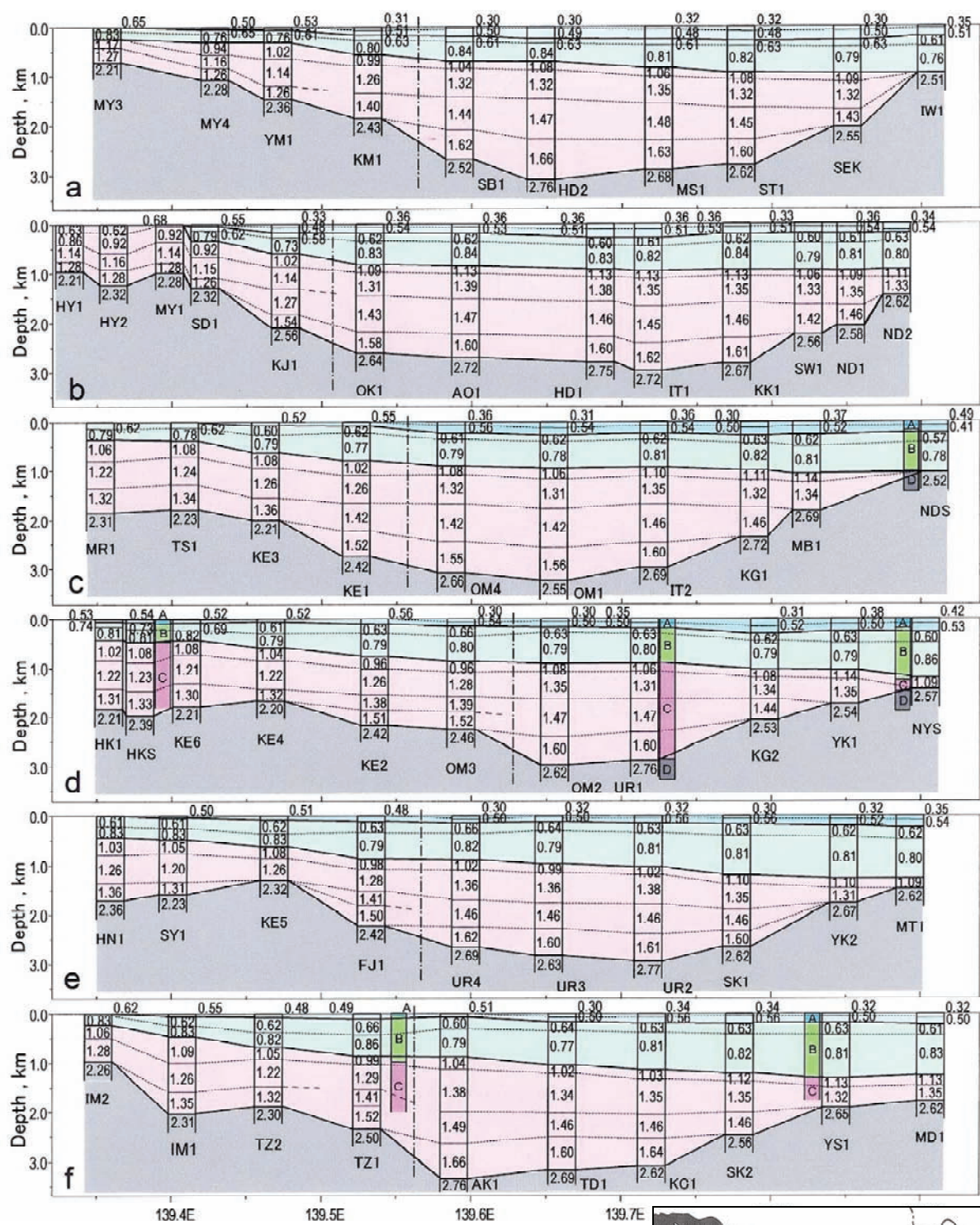


図21 探査地域の東西方向の全断面<sup>21)</sup>



#### 4. 3. 3 高精度3次元構造の推定

図21に示した各地点の速度層の関連づけが正しいと仮定すれば、全地点の速度構造を用いて各速度層の深度分布図を作成することができる。図22は、関東平野の代表的な堆積層である下総層群、上総層群及び三浦層群の各基底に対応するS波速度層の深度データを基に、その深度分布を3次元的に表示したものである。

このような分布図を作るには、地点ごとのデータを基に地点間のデータ補完を行うが、その場合、実データ地点の密度及び地点間の等間隔性が高いほど、高精度なコンターを作成することができる。今回は図19に示したように、深部構造探査としてはそれまでにない多数の地点で探査が行われ、さらに原則メッシュ状に配置された地点であるため、図のような極めて詳細な3次元構造が得られた。図から、

- ・下総層群相当層は全域的に平坦性が高いこと、
- ・上総層群相当層は南東方向に傾斜していること、
- ・三浦層群相当層の基底(基盤の上面)は中央に南北方向の深い谷があること

などがわかる。これらは、ボーリング資料及び地震探査法で推定された関東平野全体の概略構造<sup>23)</sup>に調和した傾向である。したがって、推定された3次元構造は詳細だけでなく、十分な精度を持つものと考えられる。

なお、図に示した基盤上面の深度分布図(基盤形状)は、谷の東と西で大きな違いがある。すなわち、東側は比較的単純な傾斜で基盤深度が浅くなっていくが、西側は急な尾根や窪地、ドーム構造など複雑な地形になっている。このように、図21に示した東西断面の変化が、3次元構造(層別の基底深度分布)の作成により、詳細な地形変化であることを確認することができた。

今回の広域・高密度微動探査で得られた高精度2、3次元構造は、単に地震動シミュレーションの精度向上に役立つだけでなく、上述のように詳細な地質構造の解明にも利用できることが明らかになった。これにより、微動探査法の応用分野が広がるものと考えられる。

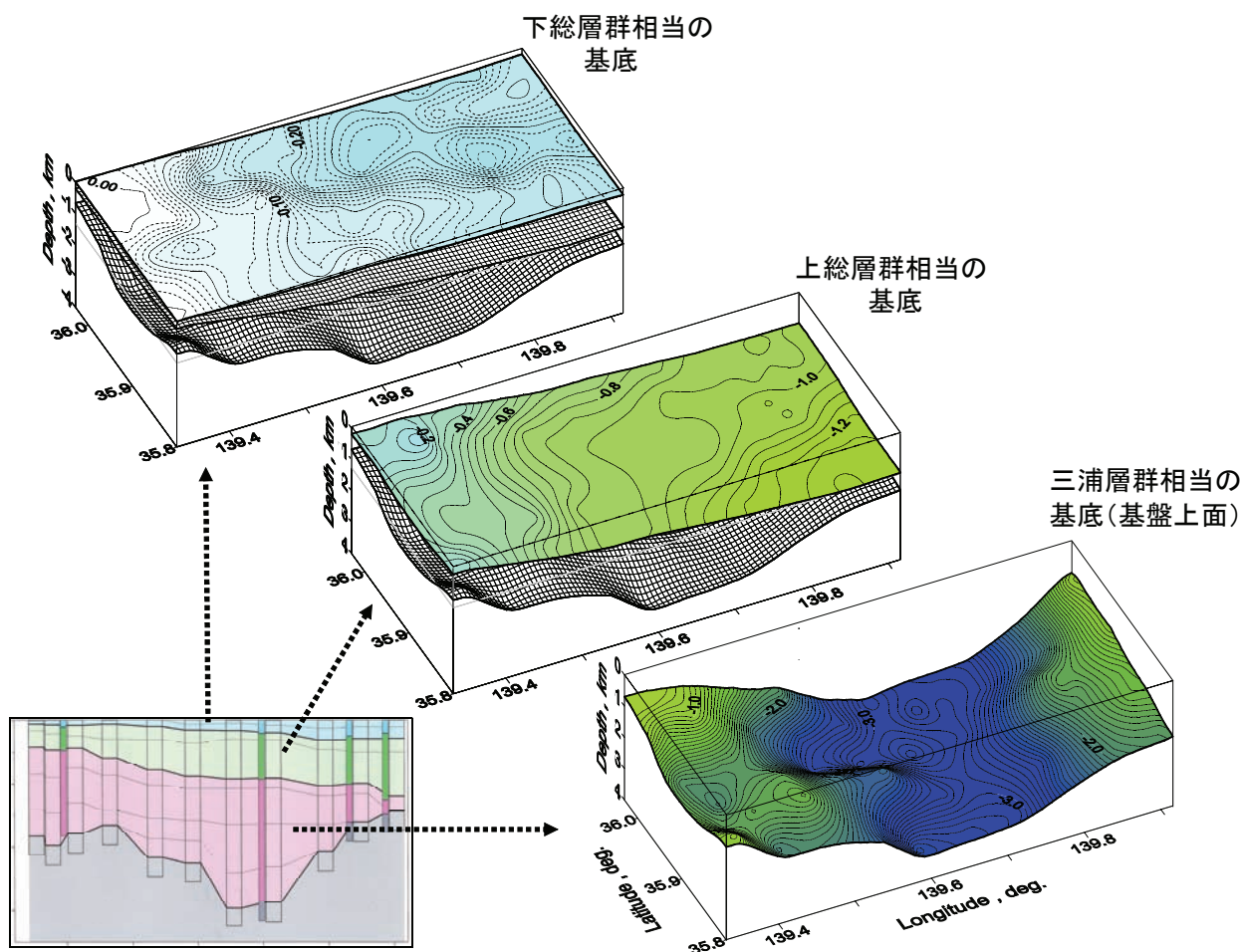


図22 探査地域の3次元構造<sup>21)</sup>



#### 4. 3. 4 探査結果の利用

今回の広域・高密度微動探査は、従来の探査事例に比べて極めて高い精度を持つものであった。また、単にS波速度構造を示すだけでなく、地形地質の解釈など幅広い成果を公表した。その結果、以下に示すように、様々な分野でこの研究成果が利用された。

図23は、最新の埼玉県地震被害想定調査(平成19年、消防防災課)<sup>24)</sup>に示された予測震度分布図を例示したものである。地震被害想定を行う場合、このように詳細な地域ごとの震度予測を行う必要がある。本研究が行われる以前は、深部のS波速度構造データがほとんどなかったため、地震動シミュレーション用の速度構造モデルはいわゆる「予想モデル」が使用されていた。

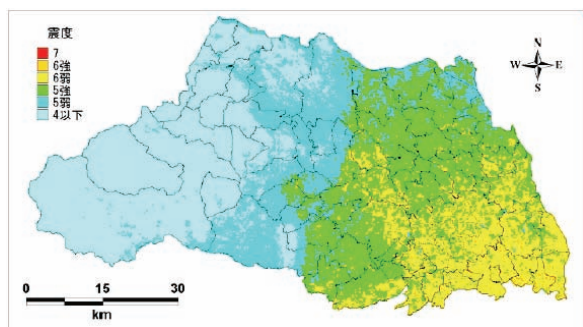


図23 東京湾北部地震の予測震度  
(平成19年埼玉県地震被害想定調査)

今回の地震被害想定では、図24に示したように、本研究で得られた全地点のS波速度構造から深部構造モデルを作成し、複数の地震観測地点における実測波形とシミュレーション波形の比較からモデルの妥当性を検証した上で、震度予測計算を行っている。このような高密度データを基に高精度な震度予測を行っているのは埼玉県だけである。

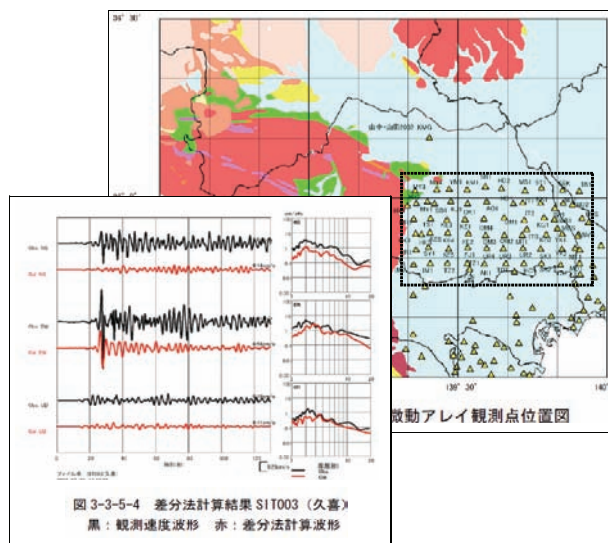


図24 地震被害想定調査への本研究成果の適用  
(平成19年埼玉県地震被害想定調査)

これにより、本研究で行った広域・高密度微動探査の成果は、埼玉県の地震災害の軽減に貢献できるものと考えられる。

また、図25は、関東平野の3次元S波速度構造モデルの構築<sup>25)</sup>に使用された微動探査地点、及びモデル作成結果の一例として基盤深度分布を示したものである。本研究の成果は県内だけでなく関東平野全域モデル作成にも利用されている。なお、図を見てわかるように、等間隔高密度の微動探査は埼玉県でしか行われていない。したがって、関東平野全域の3次元モデルは、図22に示したような詳細なモデルにはなっていない。

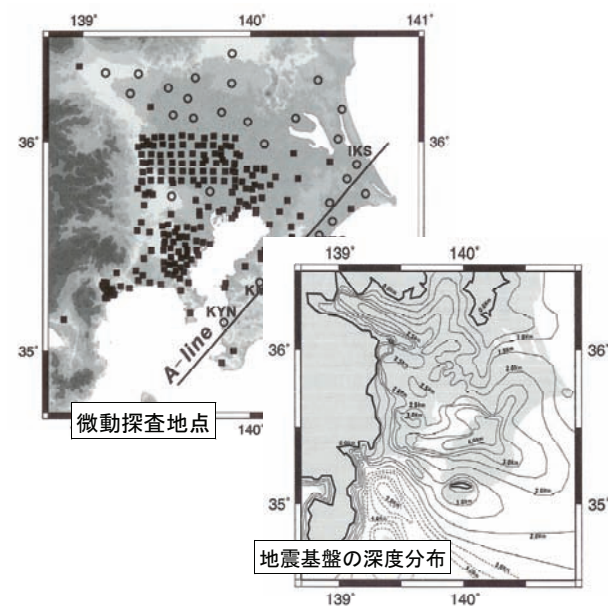


図25 関東平野の3次元構造モデル作成への適用<sup>25)</sup>

以上は、地震防災分野への適用を紹介したものであるが、本研究の構造地質学的な成果が評価され、「日本の地質 増補版」(共立出版、2005)で、関東平野の詳細な堆積層構造の説明に利用されている。

また、本研究で得られた全探査地点のS波速度構造データは、図21及び図22の2、3次元構造図とともに、「埼玉県地質地盤資料集(ボーリング柱状図集、深層S波速度構造データ集)」で公開されている。このデータは、高層建築物の耐震設計に必要であるため、民間の設計会社などが数多く利用している。

このように、深部S波速度構造は現時点では主に地震防災分野を中心に、構造地質学や建築分野への利用も広がっている。今後は、冒頭でも述べたように、地球温暖化対策としてのCO<sub>2</sub>地中貯留の実現に向けて利用される可能性が高い。そのためにも、本研究で示したような、地質構造との調和性を確保した高精度探査手法が必要となる。



## 5 浅層地下構造探査に関する研究

深部構造を対象とした埼玉県南部平野での広域・高密度探査の研究を終了した後、ただちに浅層構造探査への応用研究に取り組んだ。ここでは、はじめに研究の背景について述べ、その概要と成果について紹介する。

### 5.1 研究の背景

微動探査法の応用研究は、前述のように、従来技術である地震探査法では適用が困難な深部S波速度構造調査を対象とするものから始まった。センターの研究成果も含めて、2000年代前半にはほぼ実用化の見通しがつき、現在では深部構造探査の代表的な手法になっている。

一方、最大でも深度100m程度までの浅層構造については、当時(2000年代中期)、微動探査法の応用研究や適用事例の報告が必ずしも多くなかった。これは、浅層構造には、ボーリング調査や屈折法・反射法・PS検層など従来の探査法が適用しやすいためである。さらに微動探査法自体にも、浅層構造に広く適用するためには解決すべき課題があった。すなわち、深部に比べてはるかに複雑・多様な浅層構造を対象とする場合、4.2.2(3)で述べた「解の任意性」の問題が、より深刻になる(構造推定の精度が低くなる)ことである。

このような、必ずしも十分な利点がないと考えられていた微動探査法の浅層構造調査への適用について、センターでは、以下の視点から研究を開始した。

- ①浅層構造調査の場合でも、掘削や人工震源を不要とする探査手法の方が経済性・効率性が高く、調査場所の制約も少ないと考えられる。
- ②土壌・地下水汚染問題の解決や地盤の安全性評価などのために、今後、浅層地下構造情報を数多く集積する必要がある。

- ③国産技術である微動探査法が将来的に国際技術として発展するためには、広い分野での実用性を確保する必要がある。

本研究の方針として、上述の視点を基に、

●実用化を目的とした浅層構造探査システムの開発

●幅広い適用性を確保するための実証実験

を行うこととした。以下に、各課題ごとの研究内容と成果の概要を述べる。

### 5.2 浅層構造探査システムの開発

#### 5.2.1 開発の基本方針

微動探査法では、浅層構造のみならず適用事例が多い深部構造についても専用システムが開発されていなかった。すなわち、当時は、図11に示したような既製機器の組み合わせでアレー観測を行い、研究レベルとして作成されたソフトウェアで解析することが一般に行われていた。

このような状況では、微動探査法の普及が期待できないほか、研究者個人(あるいは特定の組織内)で使用される解析ソフトウェアでは、解析の精度や妥当性などが一般的・客観的に評価されない可能性が高い。また、専用システムでないと、観測・解析作業の効率性は低くなる。さらに、浅層構造への実用化のためには、前述の「解の任意性」の問題にも現実的に対応する必要がある。

そこで、本研究では、これらの背景を考慮して、民間企業と連携したシステムの商品化を前提に、

●観測・解析の効率性を確保した基本システムの開発

●「解の任意性」に対応するモジュールの開発

を基本の方針とした。以下に、開発されたシステムの概要を紹介する。

#### 5.2.2 効率性の高い観測・解析システム

図26に、民間企業(佐藤商事株式会社)と共同開発した浅層構造探査専用システム<sup>26)</sup>の全体概要を示す。

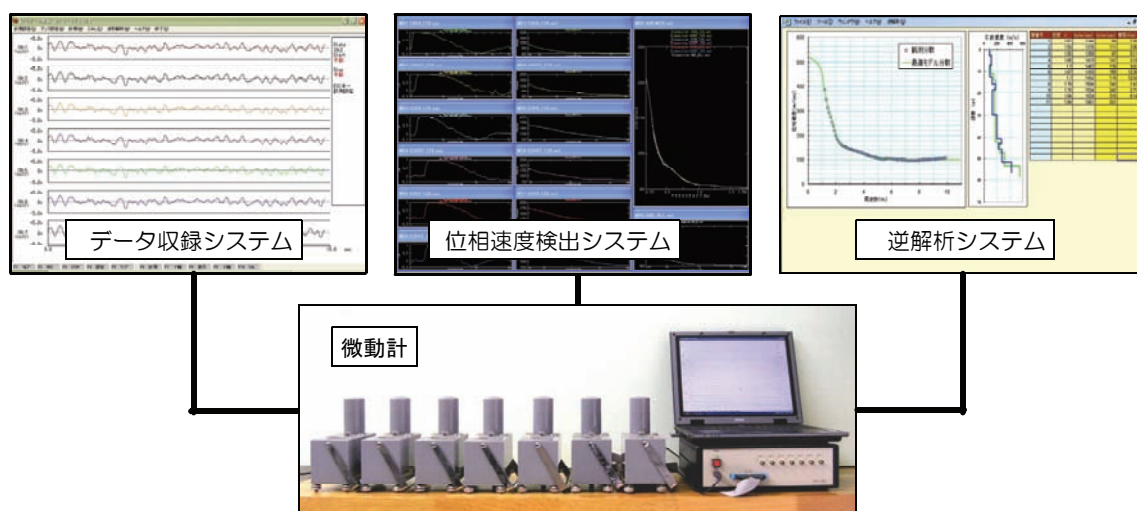


図26 開発された観測・解析システムの全体概要

このシステムの特長は、データ収録、位相速度検出及び逆解析のソフトウェアをパソコンに搭載し、観測から解析まで必要に応じて、現場で一括して実行できることにある。

これまでの微動探査は、基本的にアレー観測（現場作業）と位相速度検出・逆解析（室内作業）が別個に行われていた。しかし、アレーサイズ（及びアレーの組合せ方）は探査深度や地下構造によって異なるため、当初に行ったアレー観測では逆解析に必要な観測分散が得られずに、後日、再観測に行く場合もあった。

本システムの開発後、現場観測後ただちに観測分散を求め（作業時間5分程度）、必要に応じてアレーサイズを変更するなど、適切な対応が簡単にできることを確認した。これによって、微動探査法のアレー観測作業の適正化・効率化を大幅に高めることが可能になった。

解析ソフトウェアのうち、位相速度検出システムについては、図6に示した1996年に開発したものを改良し、位相速度検出以外の複数の信号処理機能を追加した。一方、逆解析システムは今回初めて開発されたもので、以下に概要を紹介する。

図27は、逆解析システムに取り入れた主要な最適化法であるGAについて、実際のソフトウェア画面を用いて探索手順を示したものである。はじめに、位相速度検出システムで作成された観測分散データを読み込み、適当な初期モデルを基に探索範囲を設定し、GA計算条件を設定するだけで、モデルの自動探索が始まる。

初期モデルの層数や計算条件によって探索時間は異なるが、基本的には数分で最適モデル（平均モデル及び最小残差モデル）が求められる。

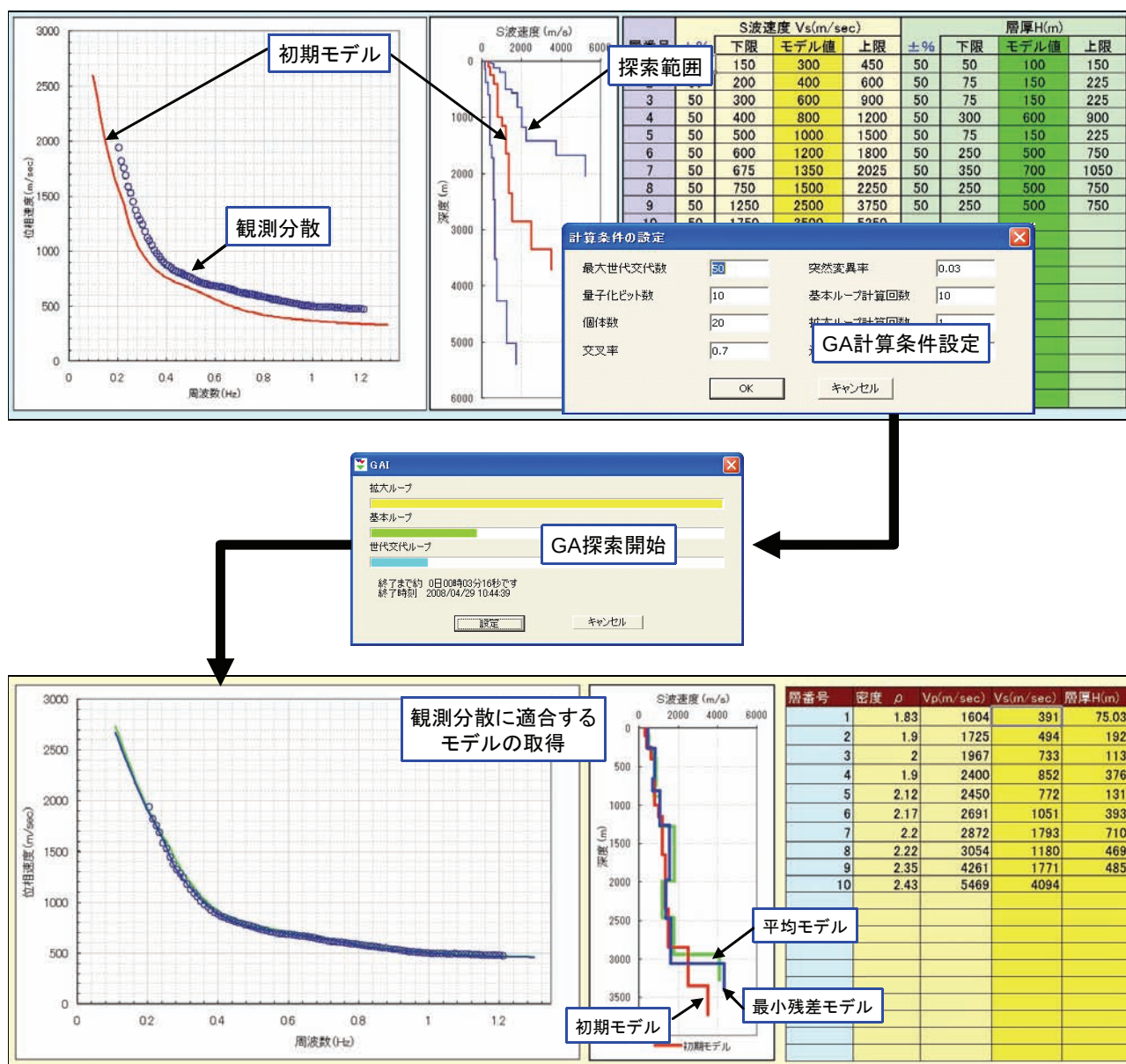


図27 遺伝的アルゴリズムによる探索の概要



このシステムには、より詳細な解析を行うために、GA以外に逐次探索という手法も取り入れている。これは、探索途中での層分割数の変更、密度及びP波速度値の変更などGAではできないことを、手解析によって行えるようにしたものである。これによって、選択範囲の広い逆解析ができるようになった。

なお、この逆解析システムには、開発の基本方針として掲げた「解の任意性」に対応するモジュールが組み込まれている。以下に、その概要を示す。

### 5. 2. 3 初期モデル検索モジュール

4. 2. 2 (3)で述べたように、「解の任意性」の問題は理論的な解決方法がない。そこで、深部構造探査の研究では、近傍の既存情報(音波、密度検層データ)から層分割数などを推定した初期モデルを作成し、拘束条件(探索範囲)を狭くしたGAにより、実際の地質構造に調和したS波速度構造を得ている。今回の研究では、この方法を一般化することを想定して、速度構造モデル及びその理論分散を中心としたデータベースを構築し、それを基に適切な初期モデルを検索するモジュールを開発した。図28は、初期モデル検索モジュールの概要を示したものである。

この検索には、2種類のモジュール(GIS検索、類似分散

検索)を利用することができる。逆解析システムのメインプログラムの「初期モデル設定ダイアログ」から、たとえば「GIS検索」を選択すると、微動探査地点周辺の既存情報が存在する地点が表示され、任意の地点をクリックするとボーリング資料から作成された速度構造モデルと理論分散が表示される。理論分散が観測分散に近似していると、その速度構造モデルは良好な初期モデルであると判断できる。

また、探査地点周辺の既存情報が少ない場合や観測分散に類似した理論分散データがない場合は、ダイアログに戻って「類似分散検索」を選択する。こちらは、データベースに搭載されているすべての理論分散データから、探査地点の観測分散との残差が小さい順に20個のデータを検索する。この理論分散の類似性やS波速度構造から、適切と思われる構造モデルを選択し、初期モデルとして利用することができる。

浅層構造の場合、既存情報となるボーリング資料(柱状図)が多数存在するため、速度構造データベースの作成は現実性の高いものである。なお、この逆解析システムには、柱状図から速度構造モデル及び理論分散データを作成するモジュールも搭載されている(図29)。これにより構造データベースも容易に作成することができる。

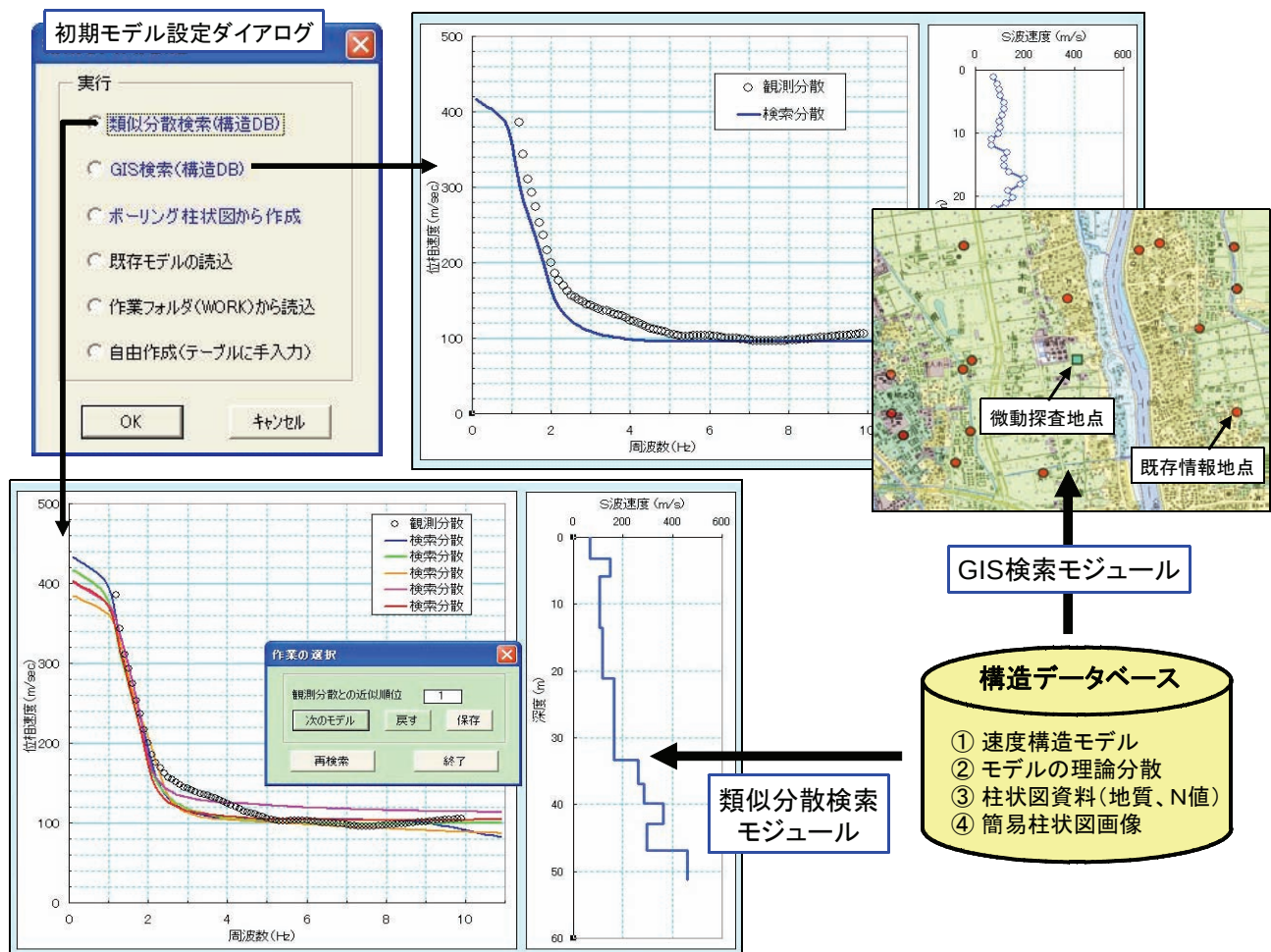


図28 初期モデル検索モジュールの概要





図31に、微動探査による情報補完の有効性を検討した結果を示した。これは、特に土木・建築分野で必要となる工学的基盤の3次元構造を示したもので、図の上部は既存の柱状図から推定された、工学的基盤に相当する砂礫層の深度分布である。扇状地に近い地域で基盤が浅い傾向を示しており、ほぼ妥当な構造推定と考えられるが、データ不足地域の影響を受けてやや不自然な地形変化となる。

一方、図の下部は微動探査で得られたS波速度構造により不足地域のデータを補完して作成した深度分布である。この基盤構造は上図に比べてはるかに詳細な形状となり、後背湿地付近に複雑な形状の尾根や谷が存在するようになる。このような現実性の高い構造推定ができれば、広域的な土地利用計画の策定に当たって、極めて有効な情報提供ができる。

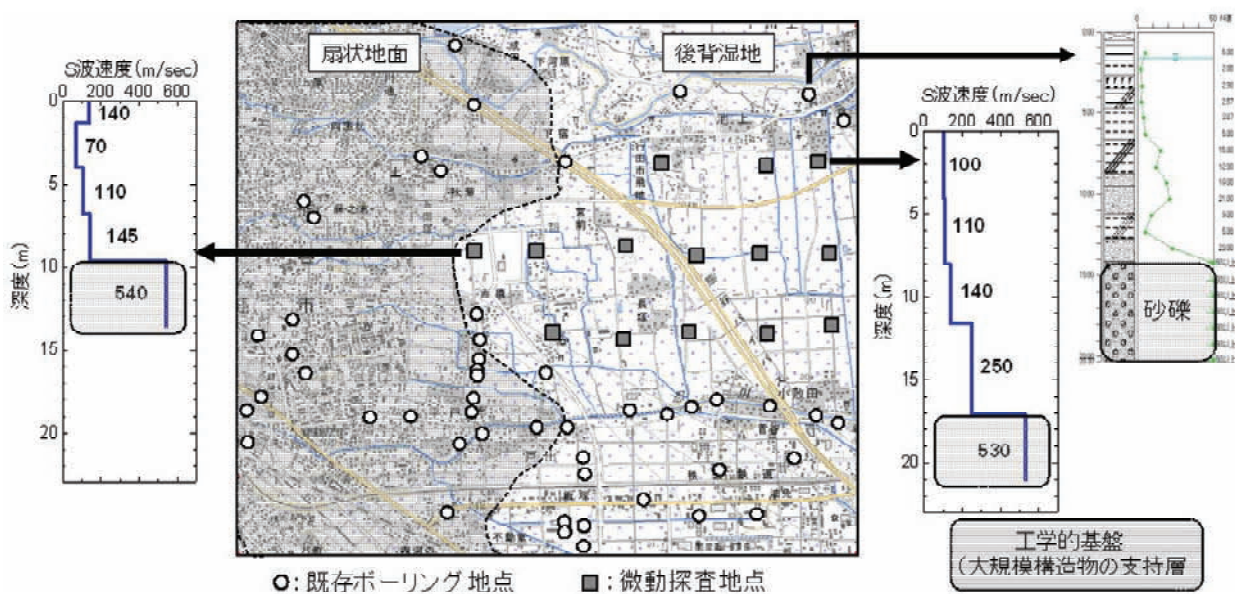


図30 地盤情報補完の実証実験地域と探査結果の例示

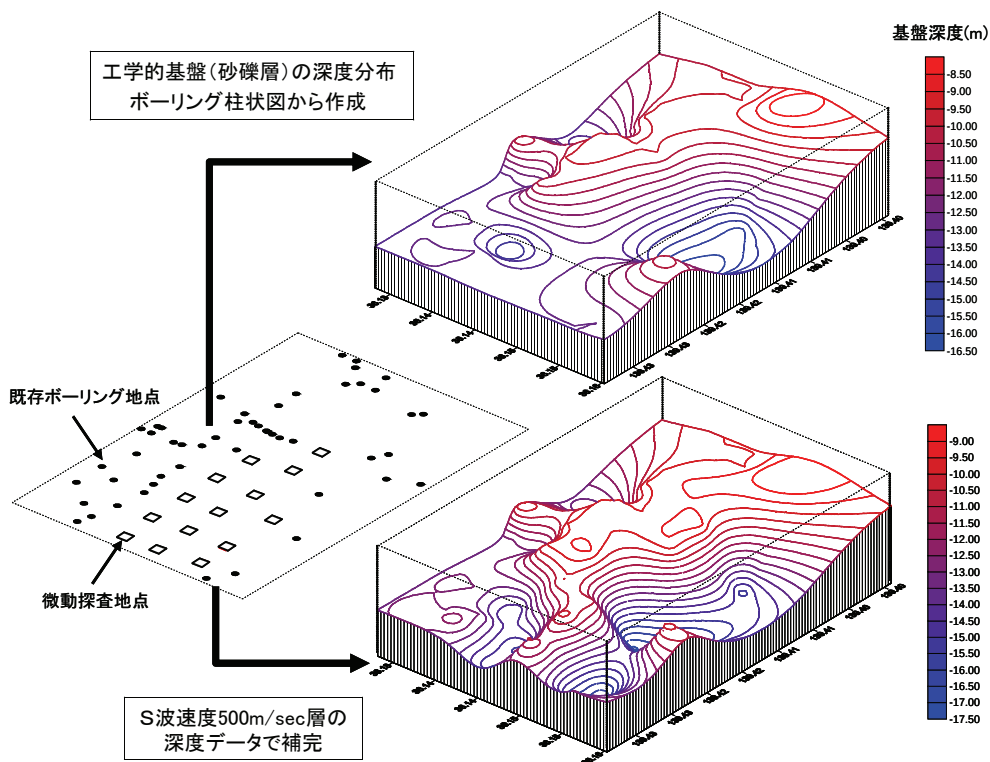


図31 情報補完による工学的基盤の詳細構造推定



### 5.3.2 帯水層分布範囲推定

近年、土壌・地下水汚染の発生件数が増加している。このような地盤環境汚染問題の解決にも、地下構造の情報が重要な役割を果たす。特に、地下水汚染については、帯水層(砂、砂礫層など)の数や分布範囲などが特定できれば、汚染調査や対策に有効に利用できる。

帯水層を調べる方法としては、ボーリング調査や電気探査などが通常用いられる。しかし、ボーリング調査は前述のような経済性・効率性などの問題があるほか、汚染現場での掘削には汚染の拡大を引き起こす危険性もある。また、電気探査は、帯水層の深さによっては相当長い測線が必要になる(経費がかかる)ほか、地下構造によっては帯水層の検出が困難な場合もある。そこで、帯水層調査への適用性を確認するために、前述の荒川扇状地末端部の別の場所でも微動探査を行った。

図32はその概要を示すものである。この地域も扇状地と後背湿地の地形境界が推定されている。この付近では、地形種の違いによる標高差が全くないため(全体が平坦な水田地帯)、図に示した境界は周辺のボーリング柱状図を基に推定されている。すなわち、図の●は扇状地タイプの柱状図があるところで、この地域全体に共通する砂礫層(図中の下部砂礫: 前述の工学的基盤)以外に、表層付近にも砂礫層(図中の上部砂礫)が存在する。また、図の○は後

背湿地タイプのもので、下部砂礫の上は軟弱な粘土層のみで上部砂礫が存在しない。

この境界推定から、両端のボーリング地点の間で上部砂礫が消失していることが明らかであるため、図に示すライン状5カ所の地点で微動探査を行い、砂礫の消失位置の特定を試みた。

アレー観測で得られた全地点の観測分散が、図の右上のグラフに示されている。この観測分散の傾向の違いから、地点番号3、4、5はほぼ同一の地下構造であり、1、2はそれと明確に異なることが予想される。図の下部に、逆解析で得られた各地点のS波速度構造を、両端の柱状図と併せて示した。図から明らかに、上部砂礫が地点番号2と3の間で消失していることがわかる。

これにより、微動探査法で帯水層の位置や分布範囲が推定できることが明らかになった。ちなみに、この5地点の探査は観測が1日、解析は3日で終了した。また、探査地点すべてが水田(農閑期)であったが、この場合も土地所有者から簡単に了解を得ることができた。

これ以外にも、様々な浅層構造探査を実施したが、いずれも想定した目的に達する結果を得ることができた。これにより、浅層構造調査でも、微動探査法の特長(掘削及び人工震源の不要)が有効に機能することが確認された。

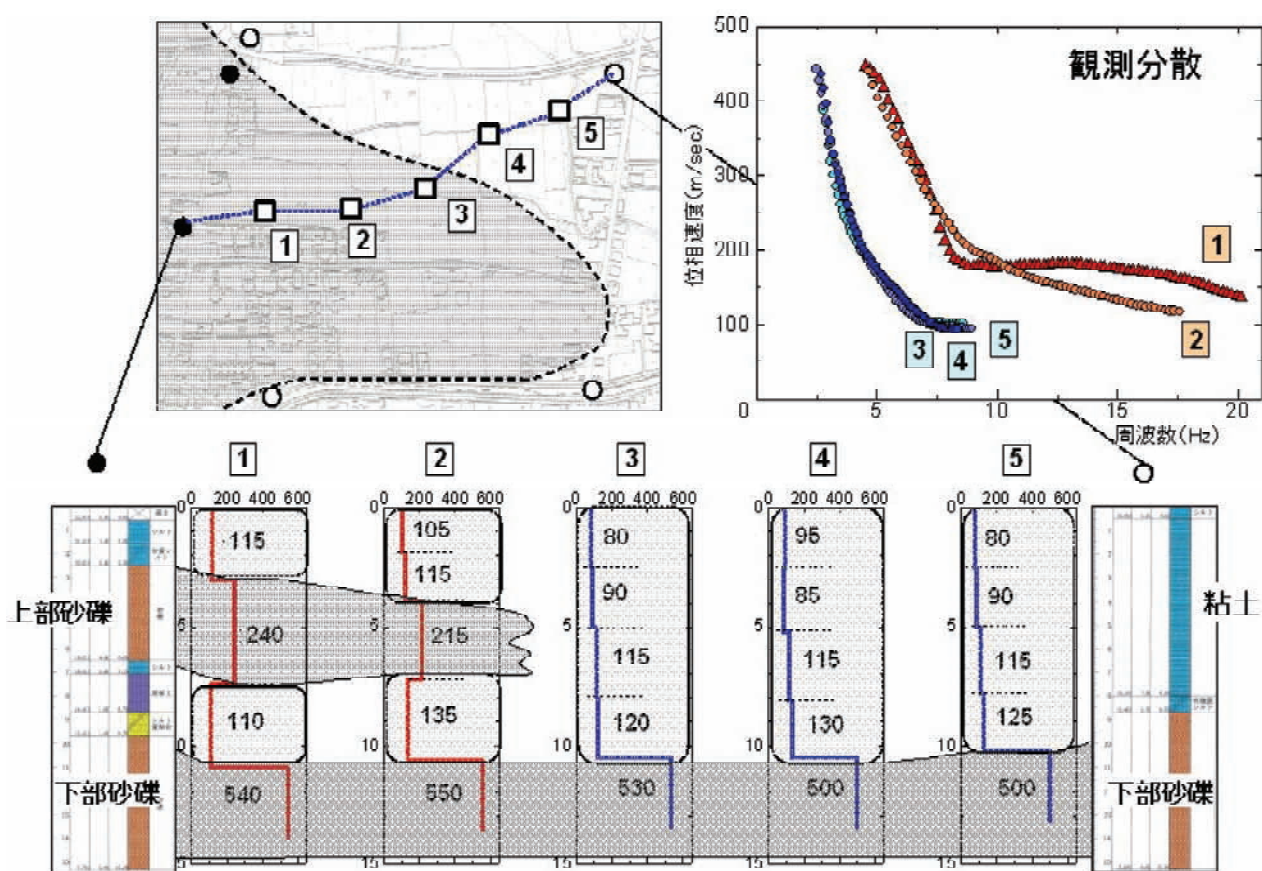


図32 微動探査法の帯水層構造推定への適用事例



## 6 おわりに

センターが長年携わってきた微動探査法の実用化研究について、その概要を説明した。微動探査法は、本稿に示したように、基礎理論が提案されてから50年近い歳月を経て、広い分野に応用できる実用技術になった。

しかし、現時点では、まだ、この優れた技術が国・自治体、民間企業等にも広く普及していない。したがって、今後はさらに多くの適用事例を集積し、学会だけでなく行政機関や関連業界等への情報提供を行う必要がある。微動探査法は経済性・効率性に優れるだけでなく、環境にも優しい技術であるため、その一層の普及が望まれる。

本研究には筆者のほか、地質地盤・騒音担当の白石英孝担当部長、佐坂公規専門研究員、八戸昭一専門研究員及び大気環境担当の梅沢夏実担当部長(旧公害センターでの研究)が関わった。また、研究開始当初から、佐藤商事株式会社の中村光宣氏(旧振動技研株式会社)には観測機器の改良、解析ソフトウェアの共同開発などの協力を得た。本研究が長期間行われ、十分な成果が得られたのは、専門性に応じた共同研究が行われたためである。

---

## 文 献

- 岡田広, 坂尻直巳(1983)やや長周期微動による地下構造の推定, 北海道大学地球物理学研究報告, 42, 119-143.
- 岡田広, 松島健, 日高英治(1987)長周期微動に含まれる表面波の位相速度推定法について—空間自己相関法と周波数—波数法の比較—, 北海道大学地球物理学研究報告, 49, 53-62.
- 山中浩明, 竹村雅之, 石田寛, 池浦友則, 野澤貴, 佐々木透, 丹波正徳(1994)首都圏西部におけるやや長周期微動のアレイ観測とS波速度構造の推定, 地震2, 47, 163-172.
- 松岡達郎, 梅沢夏実(1996)関東平野の基盤構造推定のための空間自己相関法の適用性—岩槻, 下総地殻活動観測井におけるアレイ微動観測, 物理探査学会第95回学術講演会講演論文集, 71-75.
- K. Aki (1957) Space and Time Spectra of Stationary Stochastic Waves, with special reference to microtremors. *Bull. Earthq. Res. Inst.*, 35, 415-456.
- 岡田広, 松島健, 森谷武男, 笹谷努(1990)広域・深部地盤調査のための長周期微動探査法, 物理探査, 43, 402-417.
- 松岡達郎, 梅沢夏実, 巻島秀男(1995)空間自己相関法による浅い地下構造の推定, 物理探査学会第92回学術講演会講演論文集, 149-153.
- 松岡達郎, 梅沢夏実, 巻島秀男(1996)地下構造推定のための空間自己相関法の適用性に関する検討, 物理探査, 49, 26-41.
- 工藤一嘉, 太田裕, 後藤典俊, 鏡味洋史, 塩野計司, 坂尻直巳, 成瀬聖慈, 出原考示, 竹内文朗(1976)やや長周期の微動観測と地震工学への適用(4)—Array観測による微動伝搬性の検討—, 地震2, 29, 323-338.
- 堀家正則(1980)微動の位相速度及び伝達関数の推定, 地震2, 33, 425-442.
- 小柳敏郎, 松島健, 岡田広, 森谷武男, 笹谷努, 坂尻直巳, 佐々木嘉三, 宮腰研(1990)微動探査法(4)—長周期微動を用いた十勝平野の深層地盤構造の推定—, 物理探査学会第83回学術講演会講演論文集, 172-176.
- 松岡達郎, 梅沢夏実(1996)空間自己相関法を用いた微動中のレイリー波位相速度現場決定システム, 物理探査学会第94回学術講演会講演論文集, 183-187.
- 嶋悦三, 柳沢馬住, 工藤一嘉, 吉井敏烈, 一ノ瀬洋一郎, 瀬尾和大, 山崎謙介, 大保直人, 山本喜俊, 小口雄康, 長能正武(1976)東京の基盤構造, 地震研究所彙報, 51, 1-11.
- 嶋悦三, 柳沢馬住, 工藤一嘉, 吉井敏烈, 瀬尾和大, 黒羽公明(1978)東京の基盤構造, その3, 地震研究所彙報, 53, 305-318.
- 額額一起(1995)首都圏の地下構造, 物理探査, 48, 504-508.
- 山水史生, 笠原敬司, 鈴木宏芳, 井上猛, 太田陽一, 足立幾久(1993)下総深層観測井における反射法地震探査, 地震学会講演予稿集, 2, 261.
- 鈴木宏芳(1996)江東深層地殻活動観測井の地質と首都圏地域の地質構造, 防災科学技術研究所報告, 56, 77-123.
- 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.
- 松岡達郎, 梅沢夏実, 巻島秀男(1997)空間自己相関法による関東平野の基盤構造探査(1)—埼玉県鳩山町—千葉県野田市間のS波速度構造推定—, 物理探査学会第96回学術講演会講演論文集, 453-457.
- 松岡達郎, 梅沢夏実, 白石英孝(1998)空間自己相関法による関東平野の基盤構造探査(2)—埼玉県南部地域における3次元S波速度構造の推定—, 物理探査学会第98回学術講演会講演論文集, 135-139.
- 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—深埼玉県南部地域の3次元S波速度構造の推定—, 物理探査, 55, 127-143.
- T. Matsuoka, H. Shiraishi, S. Hachinohe (2003) Estimation of three-dimensional S-wave velocity structure using microtremor array observation in the central Kanto Plain, Japan: Proceedings of 6th SEGJ International Symposium—Imaging Technology—, 429-436.
- 鈴木宏芳(2002)関東平野の地下地質構造, 防災科学技術研究所報告, 63, 1-19.

24) <http://www.pref.saitama.lg.jp/A05/BC00/h19higaisoutei/index.html>

25) 山中浩明, 山田伸之 (2006) 強震動評価のための関東平野の3次元S波速度構造モデルの構築, 物理探査, 59, 549-560.

26) 松岡達郎, 白石英孝, 中村光宣, 佐坂公規, 八戸昭一 (2007) 地下構造データベースを利用した微動探査法現場解析システムの開発, 物理探査学会第116回学術講演会講演論文集, 243-246.

## **Practical Use Studies of Microtremor Survey Method**

**Tatsuro Matsuoka**

### **Abstract**

In the Center for Environmental Science in Saitama (CESS), practical use studies of a new exploration technology called Microtremor Survey Method (MSM) for imaging subsurface structure has been performed for years. Unlike conventional reflection and refraction seismic methods which use artificial sources, the MSM utilize uncontrolled natural waves called microtremor which may be recorded everywhere on the surface of the Earth. Therefore, MSM can become an only exclusive tool in areas where conventional seismic methods are difficult or impossible to implement, such as urban or environmentally sensitive areas.

The result of the research at the CESS contributed considerably to the practical use of the MSM. In this report, the process and result of the research over 15 years are reviewed.

**Key words:** Microtremor Survey Method, exploration technology for subsurface structure, practical use studies, artificial sources, natural waves

[資 料]

## 臭素系難燃加工剤(ポリブロモジフェニルエーテル)による 県内河川底質の汚染実態

細野繁雄 蓑毛康太郎 大塚宜寿 茂木守 杉崎三男

### 1 はじめに

有機ハロゲン化合物のポリブロモジフェニルエーテル(PBDE)は、可塑性樹脂(ポリスチレン、ポリオレフィン、ポリアミド、ポリエステル)及び繊維の難燃加工剤として使用される。商品化されたPBDEには、デカブロモジフェニルエーテル(9～10臭素化物主体の混合物、DeBDE製剤)、オクタブロモジフェニルエーテル(6～9臭素化物主体の混合物、OcBDE製剤)及びペンタブロモジフェニルエーテル(4～6臭素化物主体の混合物、PeBDE製剤)があり、他は商業的に製造されていない。国内において、PeBDE製剤は既存化学物質になく、また、新規物質登録もされていない。OcBDE製剤は、平成13年に4tの国内販売量があったが、現在は使用が中止されている。DeBDE製剤は、平成13年に2,578tの国内販売量があり、60%が電子機器関連、30%が繊維関連、5%が輸送関連、5%が建築関連に現在も使用されている<sup>1,2)</sup>。PeBDE製剤及びOcBDE製剤は、POPs条約の追加候補物質となっており、OcBDE製剤にはHxBDE～NoBDEが含まれている。従って、OcBDE製剤がPOPsに指定された場合、「化学物質の審査及び製造等の規制に関する法律」における第1種特定化学物質に指定され、OcBDE、NoBDEを含むDeBDE製剤も製造・使用ができなくなると予想されている<sup>3)</sup>。

PBDEは、太陽光により容易に分解され、臭素置換数の低いジフェニルエーテルを生ずるが、環境水中に排出された場合は、水に溶解せず、生分解や加水分解されずに、懸濁物質に強く吸着されて底質に移行すると推定されている。また、生物蓄積性はPBDEの種類によって異なり、DeBDE及びOcBDEではほとんど生物に蓄積しないのに対し、PeBDEは高い蓄積性を示すとされている。急性毒性は低いと考えられるが、高濃度曝露実験においては甲状腺ホルモン系や精子形成などに影響することが確認されている。

PBDEの環境中の濃度については、1997年度に水質、底質についてDeBDEを調査して以降、大気や水生生物を含め、環境省が数回にわたり全国調査<sup>4)</sup>を行っているが、埼玉県内の環境濃度については、これまで全く調査されていない。

そこで、環境省の全国調査において、PBDEの検出頻度

が高い底質を対象に、試料の処理方法を検討して、県内の環境濃度を把握したので報告する。

### 2 調査方法

#### 2.1 試料

試料は、平成17年度のダイオキシン類の常時監視を目的に、県内12河川の14地点で採取した底質(14検体)とした。採取試料の水分含量、強熱減量は、底質調査方法<sup>5)</sup>に従った。

#### 2.2 分析

##### 2.2.1 試薬

ポリブロモジフェニルエーテル検量線作成用標準液及び内標準液はWellington Laboratories 製、溶媒は全て関東化学(株)製のダイオキシン類分析用を使用した。多層シリカゲルカラムはシグマアルドリッチ製のダイオキシン類分析用(充填済み)、アルミナはICN製のAlumina B Super I、活性炭シリカゲルには和光純薬工業(株)製の活性炭混合シリカゲルを使用した。

##### 2.2.2 試料の調製

試料は、風乾後に乳鉢ですりつぶし、目開き2mmの篩を通して均一化した。この試料から約10gを秤り取り、トルエンを用いて、約20時間ソックスレー抽出した。

抽出液にクリンアップスパイク(<sup>13</sup>Cで標識したMoBDE～PeBDE;2.5ng、HxBDE～OcBDE;5ng、NoBDE～DeBDE;12.5ng)を添加後、ロータリーエバポレーターで濃縮した。ヘキサンに転溶後、3.1で決定した条件により前処理を行い、溶出液をロータリーエバポレーター、次いで窒素気流下で乾固直前まで濃縮した。シリンジスパイク(<sup>13</sup>C<sub>12</sub>-2,2',3,4,4',5'-HxBDE;5ng)を添加し、25μLにメスアップしてHRGC/HRMSで分析した。

##### 2.2.3 GC/MS測定

試料の測定はHRGC-HRMS(HP 6890-JEOL JMS-700)を用い、分解能を10,000としたロックマス方式によるEI-SIM法で行った。キャピラリーカラムは、DB-5HT(30m、0.25mm



i.d.、 $0.25\mu\text{m}$ )を使用し、キャリアガスはヘリウムを $1.2\text{mL}/\text{min}$ の定流量で使用した。

モニターイオンは、要調査項目等調査マニュアル(環境省環境管理局水環境部企画課、平成14年3月)、平成16年度化学物質分析法開発調査報告書(環境省環境保健部環境安全課、平成17年7月)等に従って設定した。

### 3 結果と考察

#### 3.1 試料液の前処理方法

試料の前処理には、調査媒体、対象物質等により、シリカゲル、アルミナ、活性炭を単独、あるいは組み合わせ、様々なカラムクロマトグラフ処理が行われている<sup>6-13)</sup>。ここでは、報告例のうち、ダイオキシン類の分析に汎用される多層シリカゲルカラムクロマトグラフ処理を基本に、多層シリカゲルカラムクロマトグラフ処理のみ(方法1)及び多層シリカゲルカラムクロマトグラフ処理後にアルミナカラムクロマトグラフ処理(方法2)を、環境省の要調査項目等調査マニュアルに規定されている処理方法(多層シリカゲルカラムクロマトグラフ処理後に活性炭シリカゲルカラムクロマトグラフ処理:方法3)と比較して評価した。評価は、県内の都市河川で採取した底質試料の抽出液から、風乾重量で底質約10gに相当する液量を分取し、各方法により前処理した後、同一条件で分析し、クリンアップスパイクの回収率、検出物質とその濃度、クロマトグラムにおける妨害の有無を比較して行った。

各前処理操作におけるPBDEの溶出条件は、既報に従った。即ち、多層シリカゲルカラム(市販充填済み)は、ヘキサン80mLで洗浄後、10%ジクロロメタン/ヘキサン100mLで溶出した。アルミナ(10g充填)カラムは、ヘキサン50mLで洗浄後、50%ジクロロメタン/ヘキサン160mLで溶出した。活性炭混合シリカゲル(1g充填)カラムは、25%ジクロロメタン/ヘキサン160mLで溶出した。

抽出液に添加したクリンアップスパイクの回収率を、方法3

における回収率と比較して図1に示す。方法1では、#197が若干高く、#209で低くなった。逆に、方法2では、#197が若干低く、#207及び#209で若干高くなっており、いずれの方法も、高臭素化体で方法3との違いが認められた。使用した河川底質から検出されたPBDEについて、同様に、方法3における検出量と比較して図2に示す。方法2において、#191の検出量が若干低く、逆に#206の検出量が高くなっている。この2異性体は、いずれも高臭素化体であり、対応するクリンアップスパイクが添加されていないことが、検出量に違いを生じた原因と考えられる。また、方法によるクロマトグラムの違いは、認められなかった。

前処理の方法により、高臭素化体でクリンアップスパイクの回収率や検出量に違いが見られたが、大きな違いではなかったことから、試料の前処理は、最も簡便な、多層シリカゲルカラムクロマトグラフ処理のみ(方法1)とした。

この条件における検出下限値は、TrBDE~DeBDEについてマニュアル値とし、マニュアルの対象ではないMoBDE及びDiBDEについては、試料測定時におけるクリンアップスパイクのピーク強度を、TrBDE等のクリンアップスパイクのピーク強度と比較して推定した。

#### 3.2 PBDEの検出状況

調査した11河川14地点の底質試料の性状等を、検出されたダイオキシン類濃度とともに表1に示す。ダイオキシン類濃度は、軟泥で水分含量及び強熱減量の最も大きい伝右川(伝右橋)の底質で検出された $93\text{pg-TEQ}/\text{g}$ が最大であり、底質の環境基準( $150\text{pg-TEQ}/\text{g}$ )を超過する地点はなかった。

PBDEの測定結果を表2に示す。14地点中4地点のPBDEは、全て検出下限値未満であった。伝右川(伝右橋)は、検出された異性体数が最も多く、また検出されたいずれの異性体濃度も最大値を記録した。

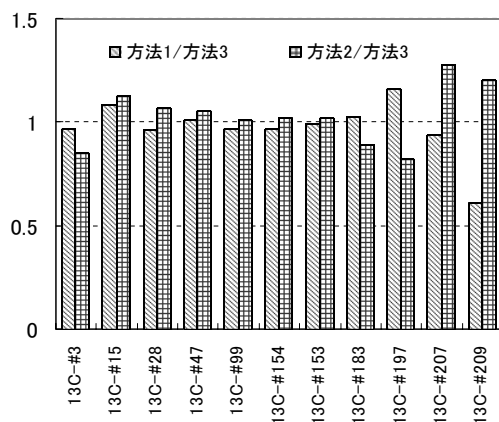


図1 処理法によるクリンアップスパイクの回収率

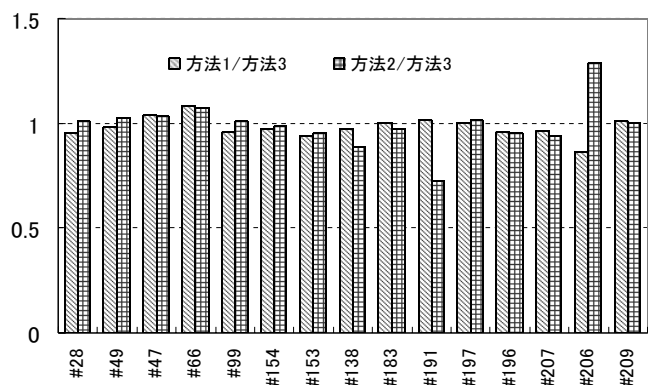


図2 処理法によるPBDE検出濃度の比較

表1 採取試料の性状等

| 河川名                     | 荒川      |      | 入間川     | 槻川     | 和田吉野川 | 元小山川 | 新河岸川 | 白子川  | 福川   | 綾瀬川  |      | 古綾瀬川 |         | 伝右川  |
|-------------------------|---------|------|---------|--------|-------|------|------|------|------|------|------|------|---------|------|
| 地点名                     | 中津川合流点前 | 親鼻橋  | 給食センター前 | 兜川合流点前 | 吉見橋   | 新泉橋  | いろは橋 | 三園橋  | 昭和橋  | 新箕子橋 | 佐藤橋  | 弁天橋  | 綾瀬川合流点前 | 伝右橋  |
| 性状                      | 粗砂      | 粗砂   | 粗砂      | 粗砂     | 泥状    | 細砂   | 細砂   | 細砂   | 泥状   | 細砂   | 細砂   | 細砂   | 軟泥/細砂   | 軟泥   |
| 色相                      | 灰色      | 灰色   | 灰色      | 茶褐色    | 黒褐色   | 灰黒色  | 灰黒色  | 黒色   | 灰色   | 灰黒色  | 黒褐色  | 灰黒色  | 黒色      | 黒色   |
| 夾雑物                     | 小石      | 小石   | 小石      | 小石     | 小石、草  | 石・小石 | 小石   | 草    | 石・小石 | 小石、草 | 小石、草 | 小石   | 小石      | 草    |
| 水分含量(%)                 | 20.4    | 16.2 | 18.6    | 14.6   | 19.7  | 22.1 | 23.4 | 23.7 | 24.7 | 22.3 | 28.0 | 22.8 | 25.3    | 67.7 |
| 強熱減量(%)                 | 1.4     | 1.2  | 2.3     | 1.5    | 3.2   | 1.2  | 2.5  | 2.2  | 2.5  | 2.9  | 2.5  | 2.2  | 3.0     | 17.6 |
| ダイオキシン類濃度<br>(pg-TEQ/g) | 0.24    | 0.25 | 0.25    | 0.31   | 4.7   | 2.6  | 4.2  | 3.2  | 3.6  | 6.7  | 6.6  | 3.3  | 15      | 93   |

表2 底質中PBDEの地点別検出状況

単位:ng/g-dry

| 河川名        | 荒川      |       | 入間川     | 槻川     | 和田吉野川 | 元小山川  | 新河岸川  | 白子川   | 福川    | 綾瀬川   |       | 古綾瀬川  |         | 伝右川   | 検出率   | 検出範囲      |
|------------|---------|-------|---------|--------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|---------|-------|-------|-----------|
| 地点名        | 中津川合流点前 | 親鼻橋   | 給食センター前 | 兜川合流点前 | 吉見橋   | 新泉橋   | いろは橋  | 三園橋   | 昭和橋   | 新箕子橋  | 佐藤橋   | 弁天橋   | 綾瀬川合流点前 | 伝右橋   |       |           |
| MoBDE #3   | <0.2    | <0.2  | <0.2    | <0.2   | <0.2  | <0.2  | <0.2  | <0.2  | <0.2  | <0.2  | <0.2  | <0.2  | <0.2    | <0.2  | 0/14  | ND        |
| DiBDE #7   | <0.01   | <0.01 | <0.01   | <0.01  | <0.01 | <0.01 | <0.01 | <0.01 | <0.01 | <0.01 | <0.01 | <0.01 | <0.01   | <0.01 | 0/14  | ND        |
| #15        | <0.01   | <0.01 | <0.01   | <0.01  | <0.01 | <0.01 | 0.01  | <0.01 | <0.01 | <0.01 | <0.01 | <0.01 | 0.02    | 0.05  | 3/14  | 0.01~0.05 |
| TrBDE #17  | <0.01   | <0.01 | <0.01   | <0.01  | <0.01 | <0.01 | <0.01 | <0.01 | <0.01 | <0.01 | <0.01 | <0.01 | 0.01    | 0.08  | 2/14  | 0.01~0.08 |
| #28        | <0.01   | <0.01 | <0.01   | <0.01  | <0.01 | <0.01 | 0.02  | 0.01  | 0.01  | 0.01  | 0.01  | <0.01 | 0.02    | 0.14  | 7/14  | 0.01~0.14 |
| TeBDE #49  | <0.01   | <0.01 | <0.01   | <0.01  | <0.01 | <0.01 | 0.05  | 0.04  | 0.03  | 0.04  | 0.02  | 0.02  | 0.04    | 0.36  | 8/14  | 0.02~0.36 |
| #71        | <0.01   | <0.01 | <0.01   | <0.01  | <0.01 | <0.01 | <0.01 | <0.01 | 0.01  | <0.01 | <0.01 | <0.01 | <0.01   | 0.04  | 2/14  | 0.01~0.04 |
| #47        | <0.01   | <0.01 | <0.01   | <0.01  | 0.02  | 0.02  | 0.14  | 0.12  | 0.06  | 0.09  | 0.07  | 0.08  | 0.14    | 1.6   | 10/14 | 0.02~1.6  |
| #66        | <0.01   | <0.01 | <0.01   | <0.01  | <0.01 | <0.01 | 0.03  | 0.02  | 0.02  | 0.02  | 0.01  | 0.01  | 0.02    | 0.19  | 8/14  | 0.01~0.19 |
| #77        | <0.01   | <0.01 | <0.01   | <0.01  | <0.01 | <0.01 | <0.01 | <0.01 | <0.01 | <0.01 | <0.01 | <0.01 | <0.01   | 0.02  | 1/14  | 0.02      |
| PeBDE #100 | <0.01   | <0.01 | <0.01   | <0.01  | <0.01 | <0.01 | <0.01 | <0.01 | 0.02  | <0.01 | <0.01 | <0.01 | <0.01   | 0.20  | 2/14  | 0.02~0.20 |
| #119       | <0.01   | <0.01 | <0.01   | <0.01  | <0.01 | <0.01 | <0.01 | <0.01 | <0.01 | <0.01 | <0.01 | <0.01 | <0.01   | 0.01  | 1/14  | 0.01      |
| #99        | <0.01   | <0.01 | <0.01   | <0.01  | 0.02  | 0.02  | 0.12  | 0.08  | 0.07  | 0.10  | 0.06  | 0.06  | 0.10    | 1.7   | 10/14 | 0.02~1.7  |
| #85        | <0.01   | <0.01 | <0.01   | <0.01  | <0.01 | <0.01 | 0.01  | <0.01 | 0.01  | <0.01 | <0.01 | <0.01 | 0.01    | 0.12  | 4/14  | 0.01~0.12 |
| #126       | <0.01   | <0.01 | <0.01   | <0.01  | <0.01 | <0.01 | <0.01 | <0.01 | <0.01 | <0.01 | <0.01 | <0.01 | <0.01   | <0.01 | 0/14  | ND        |
| HxBDE #154 | <0.01   | <0.01 | <0.01   | <0.01  | <0.01 | <0.01 | <0.01 | <0.01 | 0.09  | 0.08  | 0.05  | <0.01 | 0.02    | 0.19  | 5/14  | 0.02~0.19 |
| #153       | <0.01   | <0.01 | <0.01   | <0.01  | <0.01 | <0.01 | 0.02  | 0.01  | 0.08  | 0.39  | 0.21  | <0.01 | 0.03    | 0.52  | 7/14  | 0.01~0.52 |
| #138       | <0.01   | <0.01 | <0.01   | <0.01  | <0.01 | <0.01 | 0.02  | <0.01 | 0.09  | 0.09  | 0.05  | <0.01 | 0.02    | 0.18  | 6/14  | 0.02~0.18 |
| #156       | <0.01   | <0.01 | <0.01   | <0.01  | <0.01 | <0.01 | <0.01 | <0.01 | <0.01 | <0.01 | <0.01 | <0.01 | <0.01   | <0.01 | 0/14  | ND        |
| HpBDE #184 | <0.02   | <0.02 | <0.02   | <0.02  | <0.02 | <0.02 | <0.02 | <0.02 | 0.05  | <0.02 | <0.02 | <0.02 | <0.02   | 0.03  | 2/14  | 0.03      |
| #183       | <0.02   | <0.02 | <0.02   | <0.02  | <0.02 | <0.02 | <0.02 | 0.02  | 1.1   | 1.6   | 1.4   | 0.02  | 0.11    | 2.7   | 7/14  | 0.02~2.7  |
| #191       | <0.02   | <0.02 | <0.02   | <0.02  | <0.02 | <0.02 | <0.02 | <0.02 | 0.41  | 0.06  | 0.03  | <0.02 | 0.04    | 0.19  | 5/14  | 0.03~0.19 |
| OcBDE #197 | <0.04   | <0.04 | <0.04   | <0.04  | <0.04 | <0.04 | <0.04 | <0.04 | 0.97  | 0.67  | 0.68  | <0.04 | 0.13    | 1.8   | 5/14  | 0.13~1.8  |
| #196       | <0.04   | <0.04 | <0.04   | <0.04  | <0.04 | <0.04 | 0.08  | 0.04  | 2.4   | 1.6   | 1.0   | <0.04 | 0.29    | 3.9   | 7/14  | 0.04~3.9  |
| NoBDE #207 | <0.3    | <0.3  | <0.3    | <0.3   | <0.3  | <0.3  | <0.3  | <0.3  | 5.1   | 0.5   | 0.7   | <0.3  | 1.5     | 8.0   | 5/14  | 0.5~8.0   |
| #206       | <0.3    | <0.3  | <0.3    | <0.3   | <0.3  | <0.3  | <0.3  | <0.3  | 7.0   | 0.5   | 0.5   | <0.3  | 3.9     | 65    | 6/14  | 0.5~65    |
| DeBDE #209 | <0.5    | <0.5  | <0.5    | <0.5   | 1.6   | 0.7   | 8.9   | 4.4   | 45    | 10    | 9.3   | 9.4   | 93      | 700   | 10/14 | 0.7~700   |

検出率の高い物質は、TeBDEの#47、PeBDEの#99及びDeBDEの#206で、14地点中10地点で検出された。検出濃度は#206が他の異性体に比べて極端に高濃度であり、国内で使用されたPBDE製品のほとんどをDeBDEが占めることを反映した結果と考えられる。他方、TeBDEの#47及びPeBDEの#99はPeBDE製剤(例えば、DE-71™やBromkal 70-5DE™)の主要な構成成分であり、PeBDE製剤が使用されていた欧米では、#206と同等の濃度で検出されている<sup>5)</sup>。国内では使用されていないことから、#47及び#99の検出濃度は#206に比べ十分に低いものの、県内の河川底質にも広く分布している状況が確認された。

環境省は、1977年度からこれまでに6回、底質のPBDEを調査している(表3)。調査年度によりHxBDEやOcBDEも対象としているが、DeBDEは毎回調査されている。そこで、今回の調査で検出された、#138、#153、#154及び#156を合計してHxBDE、#196及び#197を合計してOcBDEとし、DeBDEとともに、検出率及び検出範囲を環境省実施の1988年度調査と比較した。

今回の調査における検出率は、HxBDE、OcBDE及びDeBDEが、それぞれ7/14、7/14及び10/14であり、環境省の調査よりも高率となった。このことは、環境省の調査における検出下限値が、HxBDE、OcBDE及びDeBDEでそれぞれ3.5、5及び4ng/g-dryと、今回の調査よりも高いことがその理由と考えられる。他方、検出濃度は、HxBDE、OcBDE及びDeBDEが、それぞれ0.01～0.89ng/g-dry、0.04～5.7ng/g-dry及び0.7～700ng/g-dryであり、DeBDEで環境省の調査と同等、HxBDE及びOcBDEでは環境省の調査をかなり下回った。

1998年度の調査結果に対し、環境省は、“プロモジフェニルエーテル類に関する毒性情報等を勘案し、プロモジフェニルエーテル類による環境汚染は、特に問題となるようなものではないと判断される”と評価していることから、今回の底質調査の結果も、同様に評価されるべきものと考えられる。

### 3.3 異性体濃度の特徴

Öbergら<sup>14)</sup>は、スウェーデンの排水処理施設で採取した下

水汚泥中の臭素系難燃剤を測定し、検出されたTeBDEの#47とPeBDEの#99の濃度には直線関係が見られ、71試料の平均値をもとにしたTe～HxBDEsの異性体構成は、PeBDE製剤(Bromkal 70-5DE)と良好に対応していると報告している。

今回調査した底質試料においても、#47と#99の検出濃度には良好な直線関係が認められ(図3)、#47/#99は0.81～1.4の範囲にあった。これらの値は、Öbergらが報告している71試料の平均値から算出した値(1.4)と概ね一致しており、また、環境省の報告書<sup>15)</sup>に記載されているBromkal 70-5DEの構成から算出した値(1.2)とも一致していることから、底質試料に確認された#47及び#99は、これらの異性体を主要な構成成分とするPeBDE製剤に由来すると予想される。ただし、PeBDE製剤は国内の使用実績がほとんどなく、別のPeBDE製剤標準(Wellington Laboratories製 Great Lakes DE-71™)の#47/#99(0.74)とは一致しないこと、さらに、DeBDE製剤にも#47が含まれると報告<sup>15)</sup>されており、調査した底質試料には#47、#99に比べて十分に高い濃度のDeBDEが検出されていることから、DeBE製剤に由来する可能性も否定することはできない。

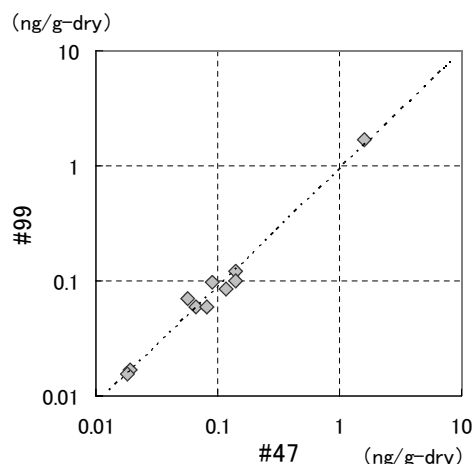


図3 TeBDE #47 と PeBDE #99 の関係 (n=10)

表3 環境省実施の底質中PBDE調査結果

単位:ng/g-dry

| 調査年度          | 対象物質  |      |        | HxBDE |      |       | OcBDE  |       |         | DeBDE |     |      |
|---------------|-------|------|--------|-------|------|-------|--------|-------|---------|-------|-----|------|
|               | 検体    | 地点   | 検出範囲   | 検体    | 地点   | 検出範囲  | 検体     | 地点    | 検出範囲    | 検体    | 地点  | 検出範囲 |
| 昭和52年(1977年)度 | —     | —    | —      | —     | —    | —     | —      | —     | —       | 0/15  | 0/7 | ND   |
| 昭和62年(1987年)度 | 4/69  | 2/23 | 7～77   | 3/51  | 1/17 | 8～21  | 16/60  | 6/20  | 10～1400 |       |     |      |
| 昭和63年(1988年)度 | 4/141 | 2/47 | 4.5～18 | 3/135 | 1/45 | 15～22 | 39/129 | 15/43 | 4～600   |       |     |      |
| 平成8年(1996年)度  | —     | —    | —      | —     | —    | —     | 15/33  | 6/11  | 30～580  |       |     |      |
| 平成14年(2002年)度 | —     | —    | —      | —     | —    | —     | 82/186 | 34/62 | 10～4400 |       |     |      |
| 平成15年(2003年)度 | 0/9   | 0/3  | ND     | —     | —    | —     | 6/15   | 2/5   | 37～76   |       |     |      |



## 4 まとめ

ダイオキシン類の常時監視を目的に、県内の12河川、14地点で採取した底質試料を用い、臭素系難燃加工剤の1種であるPBDEによる県内の汚染レベルを調査して、次のことを確認した。

測定に先立ち、県内の都市河川で採取した底質を用い、クリアップの方法を検討した。その結果、要調査項目等調査マニュアルの処理方法と同等の測定結果が得られたことから、底質試料のクリアップは、ダイオキシン類の測定に汎用される多層シリカゲルカラムクロマトグラフ処理のみとした。

調査した底質試料14検体中、10検体からPBDEが検出され、検出率の高い物質はTeBDEの#47、PeBDEの#99及びDeBDEの#206であった。

検出された濃度の範囲は、環境省が実施した1988年度の調査と同等、またはこれを下回っており、PBDEによる環境汚染は、特に問題となるレベルにはないと判断された。

検出されたTeBDE#47とPeBDE#99の濃度比は、試料を採取した河川に関係なくほぼ一定であった。これらの異性体は、PeBDE製剤の主要な構成成分であり、濃度比はPeBDE製剤(Bromkal 70-5DE)の報告値と一致した。ただし、同剤は国内の使用実績がほとんどないことなどから、これらの由来を特定するには至らなかった。

---

## 文 献

- 1) 環境省環境リスク評価室(2006)化学物質の環境リスク評価第5巻.
- 2) 新エネルギー・産業技術総合開発機構(2005)化学物質の初期リスク評価書、Ver.1.0、No.56.
- 3) 日本難燃剤協会ハロゲン部会関連資料<<http://www.frcj.jp/siryu/halogen/index.html>>.
- 4) 環境省環境安全課(2005)平成16年度版「化学物質と環境」.
- 5) 環境庁水質保全局水質管理課(1988)底質調査方法とその解説.
- 6) M. Osako, Y.-J. Kim and S. Sakai (2004) Leaching of brominated flame retardants in leachate from landfills in Japan, *Chemosphere*, 57, 1571-1579.
- 7) B. N. Zegers, W. E. Lewis, K. Booij, R. H. Smittenberg, W. Boer, J. De Boer and J. P. Boon (2003) Levels of polybrominated diphenyl ether flame retardants in sediment cores from Western Europe, *Environ. Sci. Technol.*, 37, 3803-3807.
- 8) S. Lacorte, M. Guillaumon, E. Martinez, P. Viana and D. Barcelo (2003) Occurrence and specific congener profile of 40 polybrominated diphenyl ethers in river and coastal sediments from Portugal, *Environ. Sci. Technol.*, 37, 892-898.
- 9) L. N. Zhu and R. A. Hites (2005) Brominated flame retardants in sediment cores from lakes Michigan and Erie, *Environ. Sci. Technol.*, 37, 3488-3494.
- 10) M. G. Ikonomou, S. Rayne, M. Fischer, M. P. Fernandez and W. Cretney (2002) Occurrence and congener profiles of polybrominated diphenyl ethers (PBDEs) in environmental samples from coastal British Columbia, Canada, *Chemosphere*, 46, 649-663.
- 11) B. Mai, S. Chen, X. Luo, L. Chen, Q. Yang, G. Sheng, P. Peng, J. Fu and E. Y. Zeng (2005) Distribution of polybrominated diphenyl ethers in sediments of the Pearl River Delta and Adjacent South China Sea, *Environ. Sci. Technol.*, 39, 3521-3527.
- 12) J.-W. Choi, J. Onodera, K. Kitamura, S. Hashimoto, H. Ito, N. Suzuki, S. Sakai and M. Morita (2003) Modified clean-up for PBDD, PBDF and PBDE with an active carbon column - its application to sediments, *Chemosphere*, 53, 637-643.
- 13) C. Pirard, E. De Pauw and J.-F. Focant (2003) New strategy for comprehensive analysis of polybrominated diphenyl ethers, polychlorinated dibenzo-p-dioxins, polychlorinated dibenzofurans and polychlorinated biphenyls by gas chromatography coupled with mass spectrometry, *J. Chromatogr.*, 998, 169-181.
- 14) K. Öberg, K. Warman, T. Öberg (2002) Distribution and levels of brominated flame retardants in sewage sludge, *Chemosphere*, 48, 805-809.
- 15) 環境省ダイオキシン対策室(2005)平成15年度臭素系ダイオキシン類排出実態調査結果報告書 参考資料-3 臭素系難燃物質について.