

# 極小微動アレイによる浅部構造探査システム

— 大量データの蓄積と利活用に向けて —

長 郁夫<sup>1\*</sup>、先名 重樹<sup>2\*\*</sup>

著者らの目標は、地質・地盤に関連するさまざまな社会的ニーズに対応して、できる限り高密度・高分解能で定量的な地下S波速度構造の情報を提供することである。S波速度は地盤の揺れやすさや固さに直結する物性値なので、例えば、地震災害軽減のための地震ゾーニングの高精度化等に寄与できる。その一環として、半径0.6 mの極小アレイを用いて常時微動を15分間観測するだけで数mから数十mの深さのS波速度を探索する観測・解析システムを構築中である。開発のポイントは、アレイ観測・解析の徹底的な簡易化、客観化とそれによる自動化、品質管理である。構築中のシステムにより、今後取得されると期待される膨大な量の微動データに対応する。

キーワード：微動探査、アレイ観測、レーリー波、S波速度、地盤モデル、地震計

## Constructing a system to explore shallow velocity structures using a miniature microtremor array

– Accumulating and utilizing large microtremor datasets –

Ikuo CHO<sup>1\*</sup> and Shigeki SENNA<sup>2\*\*</sup>

Our final goal is to provide quantitative information on subsurface S-wave velocity structures in response to a variety of social needs regarding geological and soil matters. Since S-wave velocity is a physical property directly related to site amplification and ground stiffness, it is expected to contribute to, for example, improving accuracy of seismic zoning for the mitigation of earthquake disasters. Currently, we are constructing a system for observation and analysis of microtremors to explore S-wave velocities within the depth range from several to tens of meters on the basis of 15-minute observations with a miniature seismic array having a radius of 0.6 m. The simplicity and objectivity of our system affords automatization and quality control, with an expected capacity to acquire large amounts of microtremor data.

Keywords: Microtremor survey method, array observation, Rayleigh wave, S-wave velocity, soil-structure model, seismometer

### 1 はじめに

2011年の東日本大震災では壊滅的な津波被害が発生したが、強震動や液状化による被害も甚大であった。地質地盤の良否により、被害が異なる。地盤のS波<sup>用語1</sup>速度は、地震による揺れやすさを知るための重要な情報となり、防災にも役立てられる。S波速度を明らかにするための一つの方法として、常時微動と呼ばれる地面の微小な揺れをデータとして用いる方法がある。

微動アレイ探査法は、数十mから数kmのスケールで地表面に地震計を配置し、数時間にわたり常時微動を群列観測（微動アレイ観測と呼ばれる（図1(a)））することで地下数十mから数kmまでのS波速度構造を推定する方法である。これは、検層<sup>用語2</sup>のように地面を掘削する必要

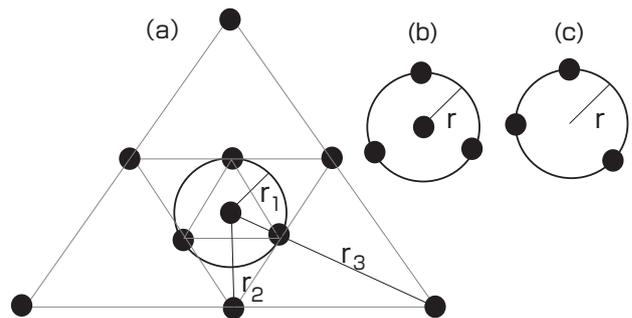


図1 微動アレイ

rはアレイ半径、黒丸は地震計。通常の微動アレイ探査法ではアレイ半径は数十mから数km程度（アレイ(a)）である。新システムでは基本的に0.6m（アレイ(b)）とし、補助的に5m程度（アレイ(c)）のものを用いる場合もある。

1 産業技術総合研究所 地質情報研究部門 〒305-8567 つくば市東1-1-1 中央第7、2 防災科学技術研究所 社会防災システム研究領域 災害リスク研究ユニット 〒305-0006 つくば市天王台3-1

1. Research Institute of Geology and Geoinformation, AIST Tsukuba Central 7, 1-1-1 Higashi, Tsukuba 305-8567, Japan \* E-mail: ikuo-chou@aist.go.jp. 2. Disaster Risk Research Unit, Department of Integrated Research on Disaster Prevention, NIED 3-1 Tennodai, Tsukuba 305-0006, Japan \*\* E-mail: senna@bosai.go.jp

Original manuscript received September 1, 2015, Revisions received November 30, 2015, Accepted December 2, 2015

のない非破壊探査である。また、いつでもどこでも存在する微動をデータとするので、人工振源<sup>用語3</sup>を用いる地震波探査法<sup>用語3</sup>と比べて低コストで都市域でも簡単に適用できるメリットがある。

著者らは、この微動アレイ探査法を浅部地盤に特化して観測・解析を徹底的に簡易化した探査システムを構築中である（以降、単に「新システム」と略す）。この新システムでは、円の中心に1台、円周上に均等に配置した3台（合計4台）の地震計で構成される半径0.6 mのアレイ（図1（b）、図2）を用いる。このアレイで15分間程度微動を観測することで深さ数mから数十mまでの浅部地盤S波速度構造を推定する。観測者として地下構造探査の専門家ではない一般のユーザー（例えば大学の研究室や高校の地学クラブ等）を想定し、ワンタッチで使える観測機材を用いる。観測後は、得られた微動データは無線でサーバー計算機に転送され、自動解析される。ユーザーの手元には解析結果が配信され、サーバー側では、観測データおよび解析結果がデータベース化される。この一連の流れを包括的に提供することを目指している。なお、新システムで用いるアレイは通常の微動アレイ探査法で利用されるものよりも格段に小さいので、ここでは極小アレイと呼んでいる。

この新システムは、著者らの一人（先名）が構築した「i微動」と呼ばれる既存システム<sup>[1]</sup>の高度化である。i微動は、微動観測キット<sup>[2]</sup>による単点観測<sup>用語4</sup>の実施、サーバーへのデータ転送、微動の水平動と鉛直動のスペクトル比（H/Vスペクトル<sup>用語4</sup>）の計算、それを用いた地震時の揺れ予測、結果配信までを含む一連の流れで構成される。なお、微動のH/Vスペクトルは、地盤固有の振動特性を表すとされている。新システムは、i微動の単点観測を極小アレイ



図2 半径0.6 mの極小アレイ（図1（b））による観測風景

に置き換えることにより、地盤の振動特性だけでなく波の伝搬速度を高精度で解析できるようにしたものと位置付けられる。

著者らの目標は、地震防災をはじめとする地質・地盤に関連するさまざまな社会的ニーズに対応して、できる限り高密度・高分解能で定量的な地下S波速度構造の情報を提供することである。そのためには膨大な量の微動データを取得・解析・蓄積する必要があり、現在、新システムでその実現を試みているところである。単点観測ほどではないにしても、極小アレイの観測は非常に簡易なので、観測点位置を変えながら多数の観測を繰り返すことにより、S波速度構造の空間変化を容易にイメージングできる。本章冒頭の通り、S波速度は地盤の揺れやすさや固さに直結する物性値なので、地震災害軽減のための地震ゾーンング<sup>用語5</sup>の高精度化に寄与できる。つまり、現状では分解能の観点から微地形区分<sup>用語5</sup>等から推定せざるを得ない表層地盤の揺れやすさを、S波速度構造や地盤振動特性の実データから評価できるようになるため、地震の揺れに関する予測精度が飛躍的に向上する。また、液状化等の地盤災害の評価や、建築・土木構造物の立地条件の検討にも寄与できる。このようにこの研究の成果には幅広い社会的な価値と波及効果が期待される。

以下ではまず通常の微動アレイ探査とこの研究の位置付けを説明する（2章）。次に、新システムの中核となる考え方を説明し（3章）、構成学的観点から開発のプロセスを述べる（4章）。なお、4.1節、4.2節はそれぞれ長、先名の分担である。最後に、今後の課題を述べる（5章）。

## 2 通常の微動アレイ探査法とこの研究の位置付け

微動は、風や波浪、産業活動等無数の振動源の影響で励起される、人体には感じない程度の小さな揺れであり、P波やS波（実体波）およびレーリー波やラブ波（表面波）<sup>用語1</sup>の重ね合わせである。実体波は減衰が大きいので振動源付近だけで卓越する。結果として、微動の波動場は一般に四方八方から到来する無数の表面波で構成される。弾性論に基づけば、このような微動の実体は容易に想定可能だが、観測データによる検証は1950～1960年代になってからである<sup>[3]~[5]</sup>。

微動の実体解明後は、微動上下動をアレイ観測し、レーリー波の伝搬速度（位相速度）を抽出してその分散特性（周波数によって伝搬速度が異なる特性）から地盤のS波速度を推定する方法、すなわち、「微動アレイ探査法」を確立するための研究がなされるようになった<sup>[6]~[7]</sup>。

1990年代後半には、微動探査法が実用化され、国内では国や自治体による地下構造調査の一環として深部地盤

構造を推定するために用いられるようになった<sup>[8][9]</sup>。深部地盤構造の推定とは、大づかみに言えば、関東平野や大阪平野等の場合では深さ数 km までに現れる地震基盤と呼ばれる S 波速度 3 km/s の基盤の深度を評価することであり、そのための作業はある程度マニュアル化されている<sup>[10]</sup><sup>[11]</sup>。具体的には、半径数十 m から 1000 m 程度にわたる大小スケールのアレイ（図 1 (a)）を展開し、自然の波浪や風を励起源とする微動を一晩（実質はアレイ半径に応じて 1 ～ 2 時間もしくは 3 時間以上）観測する（表 1）。得られた微動データから周期 0.1 ～ 10 秒のレーリー波位相速度を抽出し、その分散特性に基づいて、深さ数 km にも達するような地震基盤深度の情報を得る。

一つのアレイで解析可能な波長帯域はアレイサイズに依存し、概ねアレイ半径の 2 倍から数倍もしくは 10 数倍までの範囲と言われている<sup>[11]</sup>。探査の最大深度は解析可能な波の最大波長に依存するので、興味のある深度までカバーする広い波長帯域でデータを得るためには、アレイ半径の異なる複数のアレイで観測する必要がある。例えば、図 3 は図 1 (a) を複数回組み合わせた 6 種類の三角アレイ（半径 50 m と 100 m、250 m と 500 m、1000 m と 2000 m のアレイ；それぞれ青、緑、赤で示されている）で微動を観測して得られた位相速度の分散特性（分散曲線と呼ばれる）である。例えば、2 Hz の位相速度（青線）は半径 50 m のアレイ、0.2 Hz の位相速度（赤線）は半径 2 km のアレイで得られたものである。波長はそれぞれ 125 m、10 km に、深さスケールはそれぞれ数十 m、数 km に対応する。各アレイで得られる位相速度の分散曲線を統合して一本の分散曲線とし、観測地点の深さ数十 m から数 km までの地盤構造を表すデータとみなすことになる。

しかし、同図に示されるように、異なる半径で得られた

表 1 微動探査法の内容

項目	通常の微動探査法	新システム
微動アレイ形状・サイズ	4点アレイを組み合わせた星型のアレイ（図 1 (a)）を用いる。アレイ半径は数十 m から 1000 m ～ 2000 m 程度。	基本は半径 0.6 m の 4 点アレイ（図 1 (b)）、オプションとして半径 5 m 程度の 3 点不規則アレイ（図 1 (c)）を用いる。
観測時間	数時間。長周期微動が卓越する夜間の観測が適している。	15 分間。短周期微動が卓越する日中の観測が適している。
解析可能な波長帯域	解析可能な最小波長はアレイ半径の 2 倍、最大波長は数倍～十数倍程度。	解析可能な最小波長はアレイ半径の 2 倍、最大波長は数十倍、条件が良ければ 100 倍を超える。
探査深度	数十 m ～ 数 1000 m	数 m ～ 数十 m

データはきれいに繋がらないことが多い。異なるサイズのアレイによる分散曲線が自然につながるかどうかはデータの信頼性の指標となる。アレイごとの解析結果のつながりがあまりに悪いようならば、再観測も検討される。つまり、複数サイズのアレイ観測を実施するのは、探査深度の範囲をカバーするためだけでなく、結果の信頼性を評価するという意味もある。

この問題について、もう少し言及する。微動アレイ解析では一般に微動の振動源がアレイから十分遠方にあることが前提とされる。しかし実際には、この前提が満たされることはほとんどない。市街地で数十 m 以上の微動アレイを展開するならば、地震計の周辺やアレイ内部に交通振動等の産業活動が含まれることは避けられないからである。その結果、それらは総体として想定外の記録成分すなわちノイズとなり、アレイごとの分散曲線にバイアスを与え、最終的な分散曲線のつながりの悪さに帰結する。これは、微動

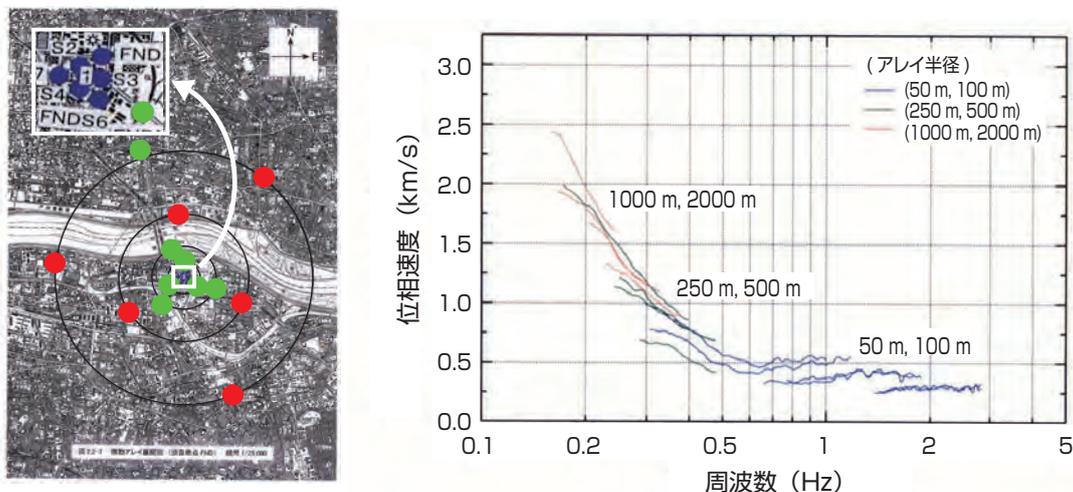


図 3 通常のアレイ探査法によるアレイ（左）とアレイごとに得られる分散曲線（右）の例（東京都による報告<sup>[12]</sup>に加筆修正）異なる半径で得られたデータは一般にきれいに繋がらないことが多い。

アレイ探査についてまわる、かなり本質的な問題である。それにも関わらず、長い間、この問題を解きほぐすための理論モデルが作られることなく、したがって定量的な検討がなされることもなく、再観測等の実務レベルでの対処に任されてきた。

このように、微動アレイ探査の枠組みは経験を基本とするところも多いという背景もあって、著者らの一人（長）は、2000年代以降微動アレイ探査に関する基礎理論の研究に取り組んだ。2000年代半ばには、微動アレイ探査の限界と可能性を把握するための理論構築も試みた<sup>[13]-[19]</sup>。浅部地盤に特化してアレイサイズの100倍以上の波長を扱う「極小アレイ」のアイデアはその時に生まれた。

一方、先名は、機動性の高い微動観測キット<sup>[2]</sup>を開発して通常微動アレイ探査法で深部地盤をモデル化する傍ら、「i微動」という単点微動観測・解析システムを開発するなど（1章）、システムチックな大量微動観測の仕組みを整備した。両者は2011年頃から互いの研究を認識し、それぞれの分担をデータ処理の理論開発および観測システムの開発と位置付けて連携するようになった。つまり、その時点で極小アレイのアイデアは原型ができており、i微動はすでに稼働していたが、それらを融合させるための研究開発を実施し、新システム（極小微動アレイによる浅部構造（数mから数十m）探査システム）の完成を目指すようになった<sup>[20][21]</sup>（図4、図5、表1）。

これは、構成学的には、i微動という既存の統合システムの1構成要素を改善することで、浅部地盤構造の情報を精度良く、かつ簡便に得ようとするものである。i微動にはもともと観測地点周辺の地質モデルと地盤振動データからS波速度構造をモデル化するという内部処理が入っている。しかし、データの性質上S波速度の拘束が緩いため、探査システムというよりはむしろ地震時の揺れ（震度）を評

価するための途中プロセスとしての位置付けである。新システムでは、既存のi微動観測を基盤技術としつつ、地盤振動特性だけでなく地盤固有の波の伝搬速度が実データとして得られるようになるので、抜本的な精度向上が可能である。新システムが完成されれば、局所探査の精度で大量探査を実現する新たな探査デバイスとなる。今後定量的な評価が必要であるが、応用範囲は非常に幅広くなる。構成学的には、既存の統合システムの1構成要素を改善することがイノベーションとなり得る例として整理できるのではないだろうか。

### 3 一般ユーザーの利用を前提とする開発方針

著者らの一人（先名）は、i微動を含むこれまでの微動関連機材の開発において、一般ユーザー（微動解析の非専門家）が利用することを前提とし、観測から解析、結果の提示までの一連の流れを包括的に提供するアプローチをとってきた。以下、これの趣旨を説明する。

我々が対象とする浅部（数mから数十m）の地盤構造は、家屋の立地や町の防災等から一般市民にも関心が高いと考えられる。この程度の深さの地盤構造は局所的に変化するもので、隣家で起こった地盤災害が一軒離れていたために被災を免れたということも起こり得る。そのため、場合によっては数mピッチでデータをとる必要がある（例えば、4.3節）。

しかし、このような高分解能は、国や自治体の地震災害軽減プロジェクト等の広域調査では実現困難である。また、ピンポイントの調査は大多数の利益にはつながりにくい。そこで先名は、地方の大学等、地域に興味を持つ一般ユーザーが自分でデータを取得し、解析や結果の閲覧までできるような自給自足の道具を構築してはどうかと考えた。このような道具を利用したいと考える一般ユーザー

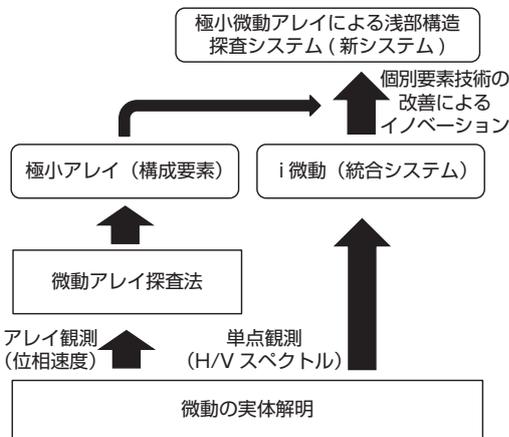


図4 構成学的観点に基づく微動研究の概念図

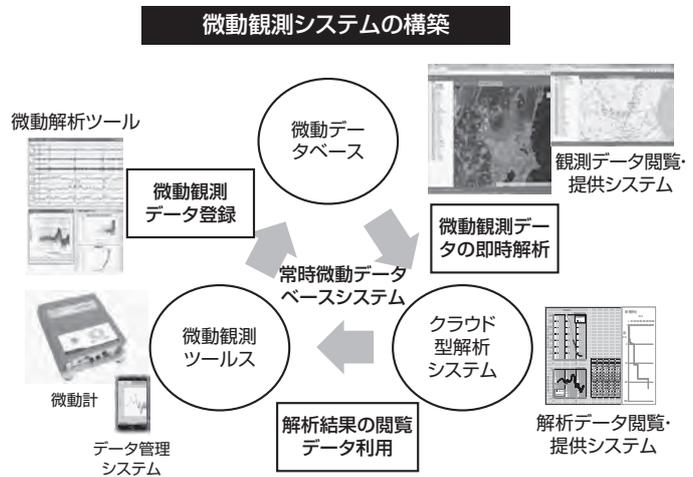


図5 微動システム構成概念図

は数の上で微動の専門家数よりもはるかに多いと推測される。各ユーザーが興味を持つ地域はそれぞれ限定的かもしれないが、幅広い層のユーザーが集まれば、広域的にデータが得られるであろう。得られたデータを中央に集約し、データベース化することを条件として、一般ユーザーに観測機材の貸与やレクチャーを行い、彼らのニーズを満たしてもらおう。このように必然的にデータが蓄積する構造ができあがれば、双方の利益となる。

このアプローチを実現するためには、一般ユーザーを対象とすべく操作や管理が簡単な観測機材を開発する必要がある。データ処理の自動化や客観的な品質管理をする必要もある。また、データの散逸を防ぎ、継続的に蓄積するために、データベース周りもセットで開発する必要がある。こうして、各要素をバランス良く開発し、機材やサービスを包括的に提供するという発想（図5）が生まれる。

上記の開発方針は新システムの場合にもそのまま適用され、極小アレイを利用することで*i*微動による観測の簡易性が失われないように注意を払っている（4.1.1、4.2.2項）。また、極小アレイとセットで開発した理論に基づく品質管理とそれによるデータ処理や視覚化までの全自動化（4.1.2項）、準リアルタイムでの結果の配信（4.2.3項）によって、全体的な使いやすさを維持している。ユーザーは、既存の*i*微動のような簡易さで、地震、地盤災害に直結する浅部S速度構造の2次元断面まで取得できる（4.3節）。

## 4 新システムの構成要素

### 4.1 理論開発

#### 4.1.1 極小アレイ解析（対策：長波長の解析限界の拡張）

既開発の*i*微動では、大量観測を目的として観測の簡易性が重視されている（3章）。このことはこの研究でも同様なので、単点観測の簡易性をなるべく減じずにアレイ観測を実施したい。そこで、路肩に停車させた乗用車の背後にアレイを設置することを一つの目標とし（図2）、半径0.6 mの4点アレイ（図1（b））を用いることとした。

従来の微動アレイ探査の基準（2章）に基づく限り、半径0.6 mの極小アレイで解析可能な波の波長は1.2 mから12 m程度となり、深さ数十 mまでの探査は困難なはずである。しかし、アレイが小さければ、アレイ内部に振動源を含まないようにできること（2章）、また工事現場等の明らかなノイズ源から離れたところに設置する等の対処も簡単なことから、長波長帯域の解析を阻むノイズの問題が軽減され、アレイサイズと比較して相対的に長い波長も取り扱えるようになると期待される。さらに、著者らが開発したさまざまな解析手法<sup>[14][17]</sup>を組み合わせれば、SN比<sup>用語6</sup>

を評価してノイズの影響を補正することが可能となり、アレイ半径の100倍以上の長波長を扱えるようになる可能性がある。また、スペクトル推定理論に基づけば、15分程度の観測時間で十分安定に解析できると推測される。

著者らはこのような理論スキームを整備した上で実機<sup>[2]</sup>を使って多数のサイトで実験を行い、その実用性を検証した。具体的には、現場到着から退去までに要する時間を約30分に抑え、ターゲットとする数十 mから場合によっては100 m以上の波長帯域における位相速度の分散特性が得られることを示した<sup>[20]</sup>。

#### 4.1.2 位相速度の読み取り（対策：解析限界の評価）

2章で述べたように、通常の微動アレイ探査法では、(i)ターゲットとする深さレンジに対応する波長帯域をカバーし、(ii)分散曲線の信頼性を担保する、という二つの観点から複数サイズのアレイを用いている。しかし、新システムでは観測の簡易性を重視し、なるべく半径0.6 mの極小アレイ（図1（b））だけの観測を基本としたい。極小アレイの場合は対象とする深さスケールを限定していることと長波長側の解析限界の拡張に成功している（4.1.1項）ことから、

(i)はクリアできる。したがって、いかにして(ii)を実現するかが問題となる。

この問題に対処するために、著者らは、SN比を評価して位相速度の解析限界を提示し、信頼性を評価するアプローチを考えた<sup>[20]</sup>。得られた解析結果の信頼性が高ければ極小アレイ1回の観測で終わらせれば良い。信頼性が低い場合は、サイズの大きい3点不規則アレイを追加的に実施することで対処することとする（次項）。

実データを用いてこのアイデアの現実性を検討したところ、理論通りの結果が得られることが分かった（技術的な詳細は参考文献[20]を参照）。これを説明するために、まず図6を見て頂きたい。同図は、半径0.6 mの極小アレイで得られた位相速度の分散曲線である。紫三角、水色クロスはそれぞれノイズの影響を補正した場合、補正しない場合の位相速度である。分散曲線は通常周波数が低くなるにつれて位相速度が速くなるが（正分散と呼ばれる）、これは地盤の深さとともにS波速度が大きくなることの反映である。同図の分散曲線も7.5 Hz以下で急激に位相速度が速くなっている。一方、7.5 Hz以上では周波数が高くなると位相速度が速くなる、いわゆる逆分散と呼ばれる傾向が見られる。これは地表近くに高速度の層があることの反映である。事実、同図の観測地点周辺では、深さ5 m程度にS波速度の非常に遅い粘土層が挟まれていて、地表付近のほうがS波速度が速いことが分かっている。

図6には、極小アレイでどの程度深さまでのデータを取れるかを示す参考指標として、波長25 m（赤線）、40 m（紫

線)、100 m (緑線) に対応する直線が描かれている。分散曲線とこれらの直線との交点は、各波長に対応する周波数および位相速度ということになる。3 Hz 以下において位相速度が減少して見える部分については除外するとして、ノイズを補正しない場合は波長 100 m 弱まで、補正した場合は波長 100 m を超えるところまで、このような交点が図上で確認でき、それらの波長と対応する位相速度が得られていることが分かる。ここでは、ノイズの影響を補正した結果の目視により(クロス)、波長 100 m を超える部分まで同定した。なお、波長 100 m はアレイ半径の 167 倍に対応する。この目視の妥当性は、半径 5 m 程度のアレイを別途実施することにより検証されている。

さて、ここまで図の見方を説明しつつ極小アレイのパフォーマンスについて述べたが、図 6 で示したいのは、位相速度の解析限界に基づく信頼性の評価である。同図において解析限界は黄点線で示されている。これは、微動記録をアレイを横切る表面波(シグナル)の成分とそれとは無相関なノイズの成分に分ける開発技術に基づいて厳密に決められた解析限界である。位相速度の推定値に比べて解析限界が十分に高速ならば、安心して位相速度の推定値を採用できると判断される。同図では、この解析限界を参考として、長波長側は波長 40 m を超える位相速度までが自動読み取りされている(黄四角)。つまり、このケースでは、極小アレイだけのデータをもとに客観的に解析結果の品質管理がなされ、少なくとも波長 40 m までは「使える」ことが自動判定された。当然ながら、この情報は専門家、非専門家に関わらず享受される。

このように、地盤の S 波速度の情報を有する新たなデータとしてレーリー波の位相速度が得られるようになったこと

が、極小アレイを用いた i 微動高度化の核心である。それをベースとして解析限界の評価を実施できるように理論開発をしたことで、客観的な品質管理とそれに基づく解析の自動化、そして一般ユーザー利用の道が拓かれた。

#### 4.1.3 3点不規則アレイ解析(対策:不規則アレイ形状の評価)

半径 0.6 m の極小アレイの解析結果が低品質だった場合、その対処としてさらに大きなサイズのアレイを実施してデータを補うこととする。ここでは、1 オーダー大きなアレイ(半径数 m)を考える。しかし、そのサイズのアレイは路肩に停車させた乗用車の背後には収まらない。また、従来は円周上に等間隔に地震計を設置する図 1 (b) のアレイが用いられてきているが、市街地では道路や建物の関係があるので、整然と配置できるとは期待できない。

その対策として、この補助的なアレイは半径 5 m 程度の 3 点不規則アレイ(図 1 (c)) とすることを考えた。従来の微動アレイ探査ではアレイを等間隔に配置することを前提としてデータ処理がされているので、このような 3 点不規則アレイの適用は困難である。しかし、著者らはすでに不等間隔な場合のデータ処理法を提案し、解析結果に及ぼす影響を理論的に評価している<sup>[13]</sup>。この研究では実機<sup>[2]</sup>を用いて、極小アレイと数 m サイズの 3 点不規則アレイを組み合わせた野外実験を繰り返し、新システムへの適用性を検討した。その結果、このアイデアの適用により目的にかなう補助データが得られること、観測時間や労力にそれほど多大な影響を与えず、十分実用的であることが示された<sup>[22]</sup>。

#### 4.1.4 地盤構造の推定(対策:簡易解析の採用)

最終的に欲しいのは地盤の S 波速度構造である。そのためには、近くの検層データや広域的な地質構造を初期モ

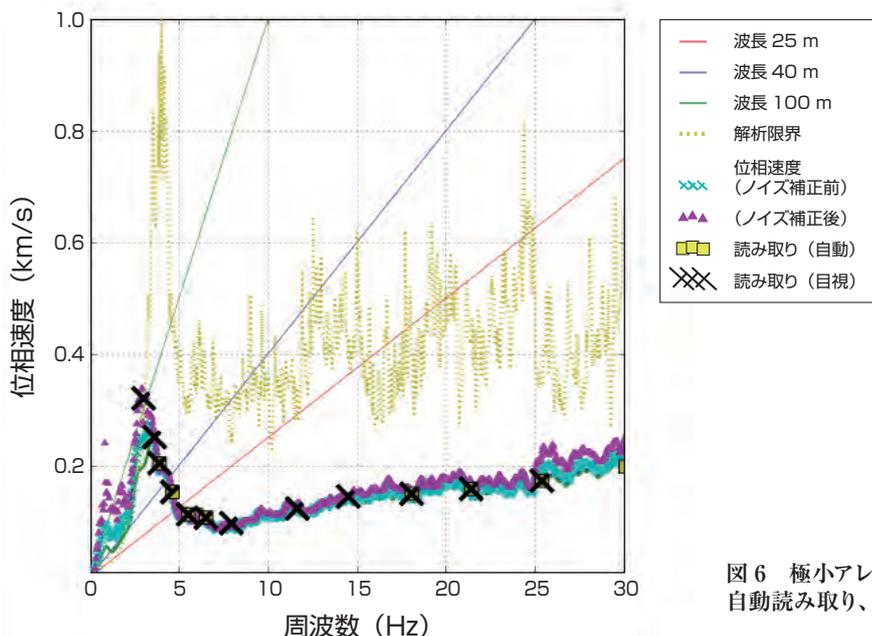


図 6 極小アレイによる位相速度(分散曲線)と自動読み取り、解析限界の評価

デルとして参照しつつ、アレイ観測で得られた位相速度に合わせてそれを修正する逐次的な逆解析が実施されることが多い。

しかし、初期モデルの作成には専門家の知見が必要となり、自動処理と解析結果の即時配信という要請と折り合わない。そこでここでは、周波数一位相速度で表される分散曲線を波長一位相速度の関係に変換し、適当なスケールングにより深さ—S波速度の関係とみなす簡易変換を採用することとした<sup>[22]</sup>。分散曲線から波長40 mに対応する位相速度を深さ30 mまでの平均S波速度とみなす方法<sup>[23]</sup>も併用する。

この対処は古典的な予備解析の範疇に入るものであるが、今回の研究と実証によって需要と供給のバランスを考慮した上で、十分納得できる範囲の結果が得られると考えている（例えば、4.3節）。ただし、現在、H/Vスペクトルと分散曲線の同時インバージョン<sup>[24]</sup>等の可能性についても検討を進めている。

#### 4.1.5 データ解析の自動化（対策：パラメータの最適化）

一般ユーザーの利用という観点から、解析区間の選択<sup>[19]</sup>、位相速度の読み取り<sup>[25][26]</sup>（図6）を含むすべての処理を自動化した。これは、読み取りにおける客観性の確保、時間短縮、ヒューマンエラー対策を兼ねている。後で目視により自動処理の結果を確認し、読み直しができる仕様とした。

地盤構造の推定では、観測地点ごとに解析結果を提示することになるが、それだけでは解釈がおぼつかないことが多い。多数の観測点の結果をつなぎ合わせて2次元的速度断面があれば、解釈の補助としてたいへん有効である。そこで、興味のある断面線を地図上で決定するだけでS波速度断面を自動描画するツールも作成した（4.3節）。

#### 4.1.6 生データ・解析結果の品質管理（対策：指標の作成）

データ欠損、GPSによる時刻同期の失敗、劣悪な設置環境等のため生データに問題がある場合、準リアルタイム的にその事実を提示することで、その場で再観測をする等の判断が可能となる。解析結果の品質が低い場合（微動の強度が低い場合SN比が低くなりターゲット深度まで探査できない、あるいは信頼性が低い等）は3点不規則アレイの追加観測を実施するという判断が可能となる。解析結果の過剰解釈を防ぐためにも、品質管理を徹底する必要がある。品質管理のための指標は、波形の最大振幅やスペクトル密度、SN比等の量を組み合わせて提示することになる。詳細は現在検討中である。

## 4.2 観測システムの開発

### 4.2.1 地震計の開発（対策：機動性、頑健性、安定性、簡易性の確保）

微動アレイ探査に用いる地震計は、応答特性の個体差が小さく、特に位相特性が揃っていなければならない。また、微動レベルの小さい地域で高品質のデータを得るために、自己ノイズが低いことが重要である。数100 mサイズの微動アレイに用いる可能性を考えると、GPSによる時刻同期と、低周波数帯域まで解析可能な広帯域地震計が必要となる。H/Vスペクトルの単点観測に用いる可能性を考えると、上下方向だけでなく水平方向の地面の動きを感知するためのセンサーが必要となる。

機動性を確保するために、小型軽量で内容物が一つの筐体に収められていること、現場での配線やクランプ除去等の手作業が不要なこと、充電時間が短く、1日の観測中電源が持続すること、電源オンから短時間で安定に記録を開始できることを条件とした。車両運搬の耐振動性、防滴性に加え、端子類の外部露出を最小限に抑えることも重要である。

これらの要件を満たすために、先名他<sup>[2]</sup>は高感度で広ダイナミックレンジ、低ノイズでバイアス温度安定性の高い地震計を開発した。同地震計の開発においては、特に記録計の振幅分解能やSN比にも注意が払われた。この機材は極小アレイの適用にも耐える性能を有することが実証されている<sup>[20]</sup>。

### 4.2.2 データ転送システムの開発（対策：データ欠損の対処等）

微動アレイ観測を大量に実施し、その解析結果までを円滑に管理するためには、観測データの取得から解析、結果の評価に至るまでの工程が少なくかつ簡単であることが必要である。特に観測によるデータ取得と解析までの間には、解析のためのデータチェック・データフォーマット変換・写真整理等の整理作業に多くの時間が割かれる。しかし、現場で簡単にデータを吸い上げ、データベースに納めることが可能となれば、沢山の観測データを楽に管理できるため、前述の簡単な観測機器と合わせ大量の観測管理が可能となる。

これらの目的を達成するためには、現場でのデータ整理から解析等（位置情報・写真情報・観測データ・時刻歴情報・解析結果等のデータ登録）の一連の工程が簡単に行え、ヒューマンエラーが少なくなる仕組みが必要である。具体的には、複数の観測機材から簡単に安定的に標準化書式を介してデータを送受信・集約し、データベースシステムや解析ソフトでデータを共有利用できる仕組みの構築を課題とした。

これらを解決するため、個々の微動計が自動で位置判

断し、1台がマスター機（親機）、その他がスレーブ機（子機）として構成され、データをマスター機に集約する機能を付加した。また、冗長性のあるACTプロトコル<sup>用語7</sup>を採用し、PCやタブレット等の端末にマスター機からデータを欠損なく送受信できるようになっている<sup>127</sup>。

#### 4.2.3 解析結果の配信（対策：迅速性の確保）

データベースに登録されたデータは、自動的に品質管理・解析され、解析結果からS波速度構造（地盤モデル）をWEBGIS<sup>用語8</sup>等にて地図情報とともに配信・確認できる必要がある。また、観測者が現地にて品質管理・解析結果を確認するためには、リアルタイムに近い形でデータベースに送信したデータを解析し、結果を閲覧できるようにする必要がある。

これらを実現するために、スマートフォン用のアプリケーションや、高速に微動データを解析・品質管理する「クラウド解析システム」の構築を課題としている。スマートフォン用アプリケーションについては、i微動<sup>11</sup>の機能をそのまま用いて、リアルタイムでデータを受けて、波形やスペクトルのチェック、簡易的な微動のSN比管理等のデータの品質管理を行えるようにする。また、クラウド解析では、入力されたデータについて詳細解析およびデータの品質管理を行う<sup>120</sup>。本クラウドシステムを使えば、使わない場合に比べて5～10倍程度高速化する。既存のi微動であれば数分以内で結果を配信できることが分かっている<sup>127</sup>。新システム（極小アレイによる浅部構造探査システム）にはこの高速化が反映されることになる。

#### 4.2.4 データベース関連（対策：書式・フォーマットの定義）

微動の生データ・解析データを効率的に閲覧・活用可能とするためのデータベースの形式を検討した。具体的には、

微動観測データについてはXML<sup>用語9</sup>形式の書式を定義し、観測生データおよび解析結果データについては、汎用性の高い数種類のフォーマット形式で収めることとした。

#### 4.3 構成要素の統合

4.1節、4.1節の構成要素を順に並べれば、3章の開発方針を実現できる。その完成度は、開発の基本方針である一般ユーザーによる利用の便・不便および結果の信頼性から量られる。利用性と信頼性は互いにトレードオフする傾向があるので、ここでは一般ユーザーが容易に結果を得られるようになった時点で利用性の目標は達成されたとみなし、開発終了とする。その時点で検証用データとの照合等から新システムの信頼性を評価する。こうして「適用範囲」が付された一つの製品となる。

現在、その途上ではあるが、ある程度の手ごたえは得られている。例えば、図7を見て頂きたい。これは、液状化現象に関連して千葉県立浦安高校グラウンドの地下構造を評価したいという地学関連の研究者（微動探査の非専門家）に新システムを試験的に利用してもらい、結果として得られたS波速度断面である。本結果は佐藤他による学会発表<sup>129</sup>で用いられた。彼らは極小アレイ観測についての簡単なレクチャーに基づいて、高校の校庭に約120mおよび40mの2測線を描き、概ね5m間隔で極小アレイ観測を繰り返した。1地点につき約20分、全体で12時間要したようである。ただし、短いほうの測線だけならば観測時間は合計2時間に満たない。

データ転送システム（4.2.2項）および解析結果の配信（4.2.3項）が未完成なので、機材返却の際、彼らから観測データを受け取った上で、データ解析から描画までを完全自動処理した結果（120mの測線）が図7である。浦安高校グラウンドの最上部は厚さ3mの埋立層であり、測線

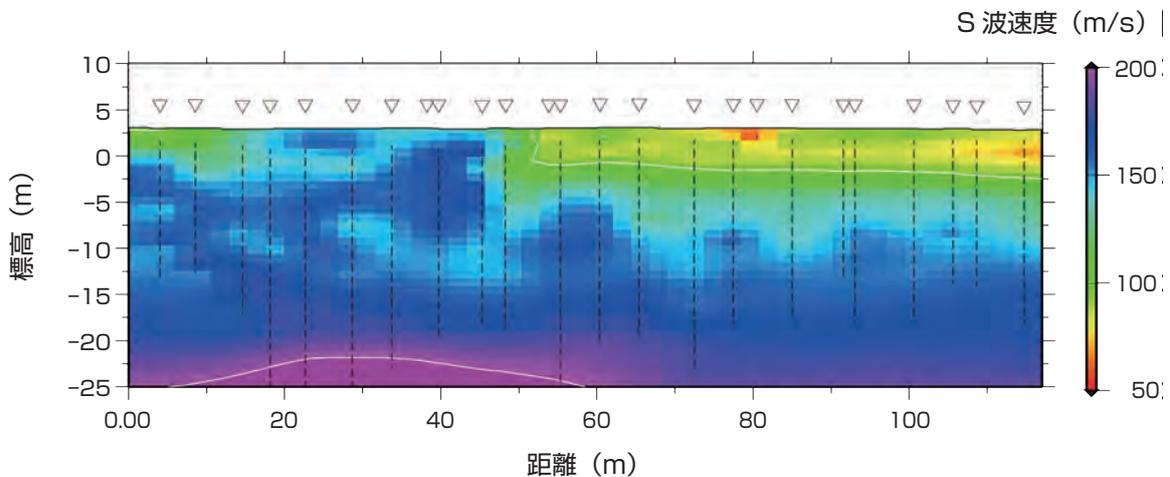


図7 浦安高校グラウンドで実施された極小アレイ探査によるS波速度断面  
断面図の右、左方向はそれぞれ南東、北西方向に対応する。断面の凡例はS波速度で単位は(m/s)。断面中の三角は個々の極小アレイ位置、点線は速度構造データが存在する深さの範囲を表す。白線は100(m/s)ごとの等速度線を表す。描画にはGeneric Mapping Tool<sup>128</sup>を用いた。

中央部付近を境に東西でそれぞれ砂層、シルト層からなることが、1965-1971年の埋立工事に関連する調査およびハンドオーガーパーリング<sup>用語2</sup>から分かっている<sup>[30]</sup>。同図の速度断面の深さ10 m程度までの部分には、横軸45 m付近を境に明瞭にこの相違が描き出されている。

## 5 将来に向けて

我々の目標は7割方完成していると考えている。未対応の構成要素（データ転送システム、解析結果配信）や、洗練可能な部分（地盤構造の推定手法等）について、今後詰める必要がある。

現在、関東地方平野部全域において1-2 kmメッシュで極小アレイによる観測が計画され、一部実施されつつある<sup>[31]</sup>。新システムの限界と可能性を見極め、今後の発展につなげるために、このデータを利用したいと考えている。

一方、著者らの一人（長）の所属する研究グループでは、高分解能地質地盤図を作成中である<sup>[32]</sup>。そこに新システムを適用し、微動データを用いたより定量的な評価を加味することを検討している。

## 用語の説明

用語1: S波: 地震波の一種。物質内部を伝搬する地震波は実体波と呼ばれる。伝搬方向と平行に振動する波はP波、垂直に振動する波はS波と呼ばれる。一方、物質の表面を伝わる地震波は表面波と呼ばれる。伝搬方向と垂直かつ水平方向に振動する波はラブ波、伝搬方向と平行かつ上下方向に振動する波はラーリー波と呼ばれる。ラブ波の伝搬により地盤の粒子は水平面で直線的に振動するが、ラーリー波の場合は垂直面内で楕円軌道を描く。

用語2: 検層: ボーリング孔を使って地下の地質や地盤の状況を測定すること。ボーリングは、地面に円筒状の穴を穿つこと、またはその穴。ハンドオーガーパーリングは手回しドリルによるボーリングである。

用語3: 人工振源: 人工的に地震波を励起するために地表付近で実施する発破や打撃、起振機による振動。人工振源を用いて励起された地震波による探査を地震波探査と言う。

用語4: 単点観測: 地震計1台を用いる観測。H/Vスペクトルは、単点観測で得られる水平方向と上下方向の地動のスペクトル比である。一般に、H/Vスペクトルは主に表面波の特性で規定されると考えられている。例えば、第一近似としてH/Vスペクトルをラーリー波の楕円率と解釈すると、ラーリー波上下動の振幅が0になる周波数がH/Vスペクトルのピーク周波数ということになる。

用語5: 地震ゾーニング: 地盤条件等を考慮して地震動の強さや被害率の分布を地図上に表すこと。地盤条件として、微地形と呼ばれる5万分の1縮尺の地形図上には明瞭には

表現しにくいほどの小規模な起伏が参考とされている。

用語6: SN比: シグナルとノイズの強度の比。

用語7: ACTプロトコル: 首都圏地震観測網 (MeSO-net) のデータを、確実かつ安定的に伝送するために開発されたデータ伝送プロトコル。プロトコルとは、情報を相互に伝達できるように決められた約束事や手順のことである。

用語8: WEBGIS: インターネット上で機能する地理情報システム。

用語9: XML: インターネット上でのさまざまなデータの取り扱いに適した汎用的なデータ記述言語。

## 参考文献

- [1] 先名重樹, 東宏樹, 武留井優子, 藤原広行: 微動探査観測システム「微動」等の開発, *物理探査学会第124回学術講演会論文集*, 346-348 (2011).
- [2] 先名重樹, 安達繁樹, 安藤浩, 荒木恒彦, 飯澤清典, 藤原広行: 微動探査観測システムの開発, *第115回物理探査学会学術講演会論文集*, 227-229 (2006).
- [3] K. Aki: Space and time spectra of stationary stochastic waves, with special reference to microtremors, *Bull. Earthquake Res. Inst.*, 35, 415-457 (1957).
- [4] M. N. Toksöz and R. T. Lacoss: Microseisms: Mode structure and sources, *Science*, 159, 872-873 (1968).
- [5] R. A. Haubrich and K. McCamy: Microseisms: Coastal and pelagic sources, *Review of Geophysics*, 7, 539-571 (1969).
- [6] 岡田広, 坂尻直巳: 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 (1983).
- [7] 岡田広, 松島健, 森谷武男, 笹谷努: 広域・深層地盤調査のための長周期微動探査法, *物理探査*, 43, 402-417 (1990).
- [8] 千葉県: 平成10年度千葉県地下構造調査 (1999).
- [9] 横浜市: 平成10年度関東平野(横浜市区)の地下構造調査 (1999).
- [10] H. Okada: *The Microtremor Survey Method*, *Geophysical Monograph Series*, 12, Society of Exploration Geophysicists, Tulsa (2003).
- [11] 物理探査学会標準化検討委員会: *物理探査適用の手引き: 土木物理探査マニュアル2008*, 111-126 (2008).
- [12] 東京都: 23区内微動アレイ探査委託(その1)に関する調査成果報告書 (2004).
- [13] I. Cho, T. Tada and Y. Shinozaki: A new method to determine phase velocities of Rayleigh waves from microseisms, *Geophysics*, 69 (6), 1535-1551 (2004).
- [14] I. Cho, T. Tada and Y. Shinozaki: A generic formulation for microtremor exploration methods using three-component records from a circular array, *Geophys. J. Int.*, 165 (1), 236-258 (2006).
- [15] I. Cho, T. Tada and Y. Shinozaki: Centerless circular array method: Inferring phase velocities of Rayleigh waves in broad wavelength ranges using microtremor records, *J. Geophys. Res.*, 111, B09315, doi:10.1029/2005JB004235 (2006).
- [16] 長郁夫, 多田卓, 篠崎祐三: 極小アレイによる新しい微動探査法: 浅部地盤平均S波速度の簡便推定, *物理探査*, 61 (6), 457-468 (2008).
- [17] T. Tada, I. Cho and Y. Shinozaki: Beyond the SPAC method: Exploiting the wealth of circular-array methods for microtremor exploration, *Bull. Seism. Soc. Am.*, 97 (6), 2080-2095, doi:10.1785/0120070058 (2007).
- [18] T. Tada, I. Cho and Y. Shinozaki: New circular-array microtremor techniques to infer Love-wave phase velocities, *Bull. Seism. Soc. Am.*, 99 (5), 2912-2926,

doi:10.1785/0120090014 (2009).

- [19] T. Tada, I. Cho and Y. Shinozaki: Analysis of Love-wave components of microtremors, *Proc. 7th International Conference on Urban Earthquake Engineering*, 115-124 (2010).
- [20] I. Cho, S. Senna and H. Fujiwara: Miniature array analysis of microtremors, *Geophysics*, 78 (1), KS13-KS23, 10.1190/GEO2012-0248.1 (2013).
- [21] 先名重樹, 長郁夫, 藤原広行: 常時微動を用いた浅部構造探査の高度化について, *日本建築学会大会[近畿]梗概集 2014*, 355-356 (2014).
- [22] 長郁夫: SPAC法の一般化とCCA法の開発について, *地球惑星科学連合* (2014).
- [23] 紺野克明, 片岡俊一: レイリー波の位相速度から地盤の平均S波速度を直接推定する方法の提案, *土木学会論文集*, No. 647/1-51, 415-423 (2000).
- [24] H. Arai and K. Tokimatsu: S-wave velocity profiling by joint inversion of microtremor dispersion curve and horizontal-to-vertical (H/V) spectrum, *Bull. Seism. Soc. Am.*, 95 (5), 1766-1778, doi:10.1785/0120040243 (2005).
- [25] 長郁夫, 先名重樹, 藤原広行: 微動を用いた浅部構造探査法の高度化(その1): 自動読み取りアルゴリズムの開発, *地球惑星科学連合* (2014).
- [26] 先名重樹, 長郁夫, 藤原広行: 微動を用いた浅部構造探査の高度化(その2)-自動読み取りアルゴリズムの適用-, *地球惑星科学連合* (2014).
- [27] 先名重樹: 微動クラウドシステムの構築, *地球惑星科学連合* (2015).
- [28] P. Wessel and W. H. F. Smith: New, improved version of the Generic Mapping Tools released, *EOS Trans. AGU*, 79 (47), 579 (1998).
- [29] 佐藤伸司, 東将士, 樋口茂生, 稲田晃, 伊藤彰秀, 岩本広志, 上加世田聡, 川崎健一, 楠恵子, 品田正一, 末永和幸, 渡邊拓美, 先名重樹, 藤原広行: 液状化地域の「微動」の解釈: 浦安地域におけるケーススタディ(2), *地球惑星科学連合* (2014).
- [30] 岩本広志, 東将士, 樋口茂生, 稲田晃, 伊藤彰秀, 上加世田聡, 川崎健一, 楠恵子, 佐藤伸司, 品田正一, 末永和幸, 渡邊拓美: 2011年東北地方太平洋沖地震による人工地盤の変状(その2)-沖合海底から浚渫された埋立シルト層の意味について-, *日本地質学会学術大会講演要旨* (2012).
- [31] 先名重樹, 松山尚典, 神薫, 若井淳, 前田宜浩, 藤原広行: 関東地域における微動観測に基づくS波速度構造の推定と地盤モデルの構築, *物理探査学会第133回学術講演会論文集* (2015).
- [32] 中澤努, 野々垣進, 宮地良典: 都市域の3次元地質地盤図-都市平野部の新たな地質情報整備-, *Synthesiology*, 9 (2), 73-85 (2016).

#### 執筆略歴

長 郁夫 (ちょう いくお)

1999年京都大学大学院地球惑星科学専攻理学研究科博士課程修了。同年北海道大学大学院理学研究科附属地震火山研究観測センター講師。2000年東京理科大学工学部第一部助手。2002年(財)地質地盤環境研究所主任研究員。2005年産総研に入所。2014年まで同所主任研究員として地震発生予測の業務研究を促進する一方、微動探査に関する研究を実施。2014年文部科学省地震調査官として活断層評価を担当。2015年産総研主任研究員として微動を軸とした地質情報の研究を進めている。同年防災科学技術研究所客員研究員。



先名 重樹 (せんな しげき)

1994年金沢大学大学院理学研究科地学課程修了。同年(株)ダイヤコンサルタント入社。2003年防災科学技術研究所研究員。2008年東京工業大学総合理工学研究科人間環境システム科博士課程修了。2014年まで同研究所研究員・客員研究員として文部科学省の地震調査研究推進本部の強震動予測地図作成業務を促進する一方、液状化調査や微動探査に関わる研究を実施。2014年防災科学技術研究所の主任研究員として、微動を軸とした地下構造モデルの構築や、システム・ツール開発、強震動予測の研究等を進めている。2013年度から産総研客員研究員。



#### 査読者との議論

##### 議論1 全体について

コメント(景山 晃:産業技術総合研究所, 栗本 史雄:産業技術総合研究所)

微動アレイ探査法は地下数十mから数kmまでのS波速度構造を推定し、地震による揺れやすさを知ることができるが、この論文では対象を浅部地盤に特化し、地震による強震動や液状化の被害が想定される都市部における高密度・高分解能で定量的な地下S波速度構造の解明を目標としている。著者らは、社会ニーズへの的確な対応、極小微動アレイ解析の理論開発と既存微動アレイ技術への適用、自動解析システムの開発、さらに一般ユーザーによる実地での試行について、一貫したシナリオに沿った研究の進捗と成果を適切に提示している。したがって、この論文はシンセシオロジーに相応しいと判断する。また、この論文は複数の要素技術からなるシステムにおいて、コア技術を新しい発想に基づいて進化させることによって、システムに革新的な機能を付加できることを示したもので、シンセシオロジーの論文として新しい構成法を提供したものと見える。

##### 議論2 要旨について

コメント(景山 晃, 栗本 史雄)

「この研究の成果がどのように社会に役立つか」を明示してほしいと思います。また、この研究の目標として「地下S波速度構造の情報を提供する」を示していますが、その波及効果にも言及すると、読者の理解が進むと思います。

回答(長 郁夫)

地下S波速度構造は「地盤の揺れやすさや固さ」に直結するので、それが高密度・高分解能で得られるようになることは「地震の揺れに関する予測精度の飛躍的向上」につながるということを冒頭に記述しました。

##### 議論3 論文の構成および構成学としての意義

コメント(景山 晃)

この論文の技術は、著者の一人が長年にわたって研究開発し実用化している微動アレイ探査法を基盤システムとし、浅い地盤の探査精度を高めることで地震時の防災・減災に貢献することに特化して理論的な検討を含めて新規技術を開発したものである。この新規技術によって基盤システムを相互補完・強化しようとする位置付けにあり、シンセシオロジー誌にとって新しい論文構成を提供するものである。この点を意識して論文全体の構成について再検討していただきたい。

回答(長 郁夫)

指摘の通り、我々は、従来の技術では打開できなかった問題が既存システムの一部改善によって一挙に可能となった例としてこの論文を執筆しました。この趣旨を明確にするため、2章の最終段落で、新システムにおいては地盤振動特性だけでなく地盤固有の波の伝搬速度を得ることにより、抜本的な精度向上が可能になったことを強調

し、既存の統合システムの1構成要素を改善することがイノベーションになりうると説明しました。また、3章の最終段落および4.1.2項の最終段落において、観測の簡易性、品質管理、データ処理や視覚化までの全自動化、準リアルタイムの配信等、技術開発のポイントを整理しました。

#### 議論4 S波速度構造観測のメリットについて

コメント（景山 晃）

S波の速度構造について論じてありますが、この技術によってどのような便益を社会に提供できると考えているのかについて、もう少し具体的に触れることはできませんか。例えば、「地震ゾーニングの高精度化」という説明がありますが、ユーザーがどのようなことを理解しやすくなり、判断の材料となりうるのかを説明できるとさらに理解が進むと思います。

回答（長 郁夫）

微地形区分を用いて推定せざるを得なかった表層地盤について、微動による物性値や地盤振動の実データを利用することにより、地震の揺れに関する予測精度を向上させられることを述べました。

#### 議論5 図4について

コメント（栗本 史雄）

図4にはこの研究の構成要素が網羅されていますので、この図を使ってこの論文のシナリオが示されると良いと考えます。

回答（長 郁夫）

「微動アレイ探査法」から「極小アレイ」に至る展開が重要なポイントであり、この過程はこの論文の構成学的な大きなポイントと判断していますので、この過程を中心にこの論文をまとめました。なお、この論文では、「極小微動アレイによる浅部構造探査システム」を「新システム」と呼んでいます。

#### 議論6 4.1.3項の3点不規則アレイについて

質問（景山 晃）

4.1.3項の第2段落で、「従来の微動アレイ探査ではこのような3点不規則アレイの適用は困難」とありますが、これは不等間隔な場合のデータ処理法が検討、開発されていなかったためですか。であるとする、従来の微動アレイ探査ではアレイを等間隔に配置することを大前提として、観測データの処理法を整備していたが、執筆者らは「素朴な疑問」に立ち返ってアレイ位置が不規則な場合のデータ処理法を新規に開発・評価し、十分に実用可能であることを立証したという位置付けになるとと思いますが、この理解でよいですか。

回答（長 郁夫）

その通りです。ご質問を参考に、該当箇所に「従来の微動アレイ探査ではアレイを等間隔に配置することを前提としてデータ処理がされている」ことを追記し、舌足らずなところを補いました。