

	まつ おか たつ ろう
氏 名	松 岡 達 郎
授 与 学 位	博士 (学術)
学位授与年月日	平成 16 年 3 月 25 日
学位授与の根拠法規	学位規則第 4 条第 1 項
研究科, 専攻の名称	東北大学大学院環境科学研究科 (博士課程) 環境科学専攻
学位論文題目	微動探査法による堆積平野深部 3 次元構造の高精度推定に関する研究
指 導 教 官	東北大学教授 新妻 弘明
論 文 審 査 委 員	主査 東北大学教授 新妻 弘明      東北大学教授 林 一夫 東北大学教授 佐藤 源之      東北大学助教授 浅沼 宏

## 論 文 内 容 要 旨

日本の大都市の多くが立地する堆積平野は、日本列島の第三紀以降の大規模な構造運動によって形成されたもので、基盤岩上に堆積する地層の層厚が 3000m を超えるところも少なくない。この厚く軟質な堆積層の存在は、基盤から入射する地震波を増幅させることにより、激甚な地震災害を引き起こす自然要因となる。また、堆積層に豊富に含まれる流体資源（天然ガスかん水、地下水など）の過剰揚水による地盤沈下、都市生産活動に伴う地下水汚染などの環境問題は、堆積層に与える人為的な作用によって発生する。したがって、都市の地震災害の軽減や資源・環境問題を検討する上で、堆積平野の深部基盤に至る地下構造（弾性波速度などの物性構造、地質構造）を解明することは重要な課題である。

そのために、関東平野など主要な堆積平野では坑井掘削による地質学的な調査とともに、地震探査（屈折法・反射法）や速度検層・VSP などの様々な物理探査が実施されてきた。しかし、強震動や地下水流動などのシミュレーション手法の多次元化・高精度化に必要とされる詳細な 2・3 次元構造については、必ずしも十分に解明されていない。その主な理由は、石油や鉱山などの資源開発に利用されてきた従来の調査法が、密集市街地での適用性や経済性の問題から、都市域を含む堆積平野の広域・深部探査に適していないことである。最近では、この問題を解決する新しい地下構造調査法として、簡便な観測・解析によって深部 S 波速度構造が推定できる微動探査法の適用が試みられている。しかし、従来法に比べて構造推定の精度が低いことから、現時点では概査的な利用にとどまっている。

本研究は、都市の地震防災、地下の資源利用および環境保全対策に必要な、堆積平野深部の詳細な地下構造（S 波速度構造）の推定を実現するために、高精度 3 次元探査に適用可能な微動探査法の確立を目的として行ったものである。

第1章は緒論として、はじめに、堆積平野の詳細な地下構造把握の必要性を主に地震防災における強震動予測の観点から記述した。次に、関東平野を対象に従来法を中心とした既往の地下構造調査の概要を述べ、堆積層の構造が十分に解明されていないこと、特に強震動予測に必要なS波速度資料が極めて不足している現状を指摘した。さらに、微動探査法による地下構造推定手順（微動アレー観測、表面波位相速度の検出、位相速度の逆解析）の概要を述べ、高精度3次元探査を実現するために解決すべき課題を整理した。そこでは、本研究の微動探査法による高精度3次元探査が、

- ① 反射法（VSP）と同等の層分解能および地質構造との整合性を確保した1次元S波速度構造をもとに、
- ② 広域的に高い空間分解能で2・3次元構造が推定できること、

を目標とするものであることを示し、その実現のためには、微動探査法の精査的な適用を可能とする「位相速度検出の精度と効率性の改善」および「一意性の高い解を導く逆解析法の構築」が必要であることを指摘した。

第2章では、微動探査法の表面波位相速度検出に関する基礎的な検討結果を記述した。本研究では、位相速度検出法として広く利用されているF-K法（周波数-波数スペクトル法）に代えて、SPAC法（空間自己相関法）を採用した。その理由は、SPAC法に用いられる観測アレーの規模がF-K法より小さく、空間分解能の高い3次元探査に適していると考えたためである。はじめに、従来のSPAC法の位相速度検出方法（バンドパスフィルタで抽出された成分波による時間領域の演算）では、多数の観測とデータ処理を必要とする3次元探査の実現が困難であることを指摘し、新たにFFTを用いた効率性の高い検出アルゴリズム（FFT法）を提案した。さらに、FFT法に基づく位相速度検出ソフトウェアを開発し、アレー観測から位相速度検出（観測分散曲線の作成）までの作業を一体化した観測・解析システムを構築したことを述べた。

次に、これまでの微動探査法の研究では、地下の速度構造モデルから計算される理論分散を根拠とした観測分散の評価（レイリー波基本モードの識別、観測・解析誤差の検討など）が十分でないことを指摘し、速度構造が既知の浅層地盤で実施された小規模アレー実験の結果を述べた。そこでは、まず、多様な構造をもつ6カ所の地盤で観測された位相速度分散がいずれも理論分散（レイリー波基本モード）に一致することを示した。つづいて、微動パワーが不足する周波数領域でのSPAC法の観測誤差の原因を明らかにして、誤差を回避するための観測方法を提示した。また、定常確率過程として扱われる微動のスペクトル解析（FFT演算）の誤差（偏り誤差、分散誤差）が位相速度検出に及ぼす影響を詳細に検討し、それら解析誤差を抑制するためのFFT解析パラメタの設定方法を示した。

最後に、SPAC法で検出可能なレイリー波基本モードの表面波の波長範囲が実験的にはアレー半径の約2.5～

21 倍であることを示し、空間分解能の高い 3 次元構造を推定するためには、上限が 7 倍程度の F-K 法に比べて SPAC 法が有利であることを示唆した。

第 3 章では、物理検層や地質層序などの地下構造資料が利用できる 8 カ所の深層坑井（関東平野中央部に散在する深度 1000m 級～3000m 級）の近傍で実施されたアレー観測に基づいて、位相速度の逆解析問題の考察を中心に深部 S 波速度構造（1 次元構造）の高精度推定について検討した結果を述べた。はじめに、深部探査に必要な長周期の位相速度検出には、半径 100m, 300m および 600m 級の円形アレーの組み合わせが妥当であること、位相速度の低域側の検出限界が微動のパワースペクトルに依存することを示し、長周期微動のアレー観測法を定式化するために必要な条件を提示した。

次に、微動探査法の地下構造推定に関する問題点（逆解析における解の初期モデル依存性と任意性）を整理し、高い層分解能をもつ構造を一意的に導く逆解析法を提示した。この方法は、音波・密度検層結果または坑井地質層序を層分割の事前情報として与え、速度構造モデルの変数パラメタ（S 波速度、層厚）の探索に強い制約条件を課す遺伝的アルゴリズム（GA）を適用するものである。この方法を各アレー観測サイトの構造推定に用いる具体的な手続きと逆解析結果を示し、事前情報に整合する S 波速度構造が推定できることを確認した。また、逆解析の過程で深部層ほど解の任意性が高くなることを見だし、その原因を層厚パラメタの位相速度計算における感度特性によって説明した。さらに、推定された構造を既往の S 波速度調査結果（速度検層、VSP）および坑井地質層序と対比した結果を述べ、本研究に用いた逆解析法によって VSP と同等の精度をもち、深部地質構造と良好に調和する S 波速度構造が推定できることを示した。

最後に、各アレー観測サイトで微動探査法によって推定された S 波速度と坑井の音波検層による P 波速度の関係性を求め、既往の地震探査による P 波速度構造を S 波速度構造に変換して逆解析の事前情報に利用できる可能性があることを示唆した。

第 4 章では、関東平野中央部の広域（東西 50km, 南北 30km）を対象に実施された面的密度の高い微動探査（5km 間隔, 61 地点）について記述し、堆積平野深部の詳細な 2・3 次元構造を推定する具体的手段を示した。また、推定された 2・3 次元構造の精度の検討結果やこの探査で得られた深部構造の新しい知見を述べ、本研究で提案した方法（広域・高密度微動探査法）が堆積平野の高精度 3 次元探査に有効であることを示した。

本章では、はじめに、アレー観測（および位相速度検出）の効率性を高めるために開発した微動探査法の専用観測システムの概要を示した。このシステムは、アレー観測に必要な機能（微動観測・同時サンプル・記録保存）

の一体化と携帯電話による観測動作の遠隔制御をはじめ導入したもので、広域・高密度探査に伴う多数の観測作業に有効であったことを述べた。

次に、信頼性の高い2・3次元S波速度構造を推定するためには、精度とともに探査地点間の速度層序の整合性を確保した1次元構造の決定が重要であることを指摘し、それを実現するための逆解析方法を提案した。これは、第3章で提示した制約条件付きGAを探査地域内の既知構造資料（第3章で決定されたS波速度構造、反射法・屈折法によるP波速度構造、重力基盤深度分布）に拡張して適用するもので、その実際の手続きを詳細に示した。さらに、全地点の1次元構造をもとに堆積層を最大8分割した詳細なS波速度断面を推定し、それが反射法と同等以上の層分解能をもち、坑井地質層序に良好に整合する構造であることを示した。つづいて、関東平野の代表的な地質区分に用いられる下総・上総・三浦層群に対応する速度層の3次元深度分布を推定し、特に基盤相当層の深度分布と重力基盤深度分布との異同を詳細に検討した結果を述べた。

最後に、広域・高密度探査で集積された多数のS波速度資料の分析から、特に基盤のS波速度分布に地域的・系統的な相違があることを見だし、関東山地に近い平野西部では通常想定される値（約3km/sec）より低い速度（平均、2.29km/sec）をもつことを指摘した。また、これに関連して、微動探査法では困難であるとされてきた深部基盤の精度の高いS波速度の推定が、本研究の逆解析に用いた重層基盤モデルでは可能になることを感度解析によって実証した。

以上述べたように、本研究によって堆積平野深部の高精度3次元探査に適用可能な微動探査法が確立された。本研究で提案した広域・高密度微動探査は、高度に都市化された地域に対しても容易に適用できるため、都市の地震防災や資源・環境問題の検討のみならず、堆積平野の地質学・構造地質学的な研究の進展にも貢献できるものと考えられる。

# 論文審査結果の要旨

都市の地震防災、地下の資源利用および環境保全対策を検討する上で、堆積平野の深部基盤に至る地下構造の把握は重要な課題である。しかし、強震動や地下水流動などのシミュレーション手法の多次元化・高精度化に必要とされる詳細な2・3次元弾性波速度構造については資料が極めて不足しているのが現状である。これは、石油や鉱山などの資源開発に利用されてきた従来の調査法が、密集市街地での適用性や経済性の問題から、都市域を含む堆積平野の広域・深部探査に適していないことによっている。本研究は、堆積平野深部の詳細な地下構造（S波速度構造）の推定を実現するために、高精度3次元探査に適用可能な微動探査法の確立を目的として行ったもので全編5章からなる。

第1章は緒論である。

第2章では、微動探査法における表面波位相速度検出に関する基礎的な検討を行っている。そこでは新たにFFTを用いた効率性の高い空間自己相関法を提案するとともに、本方法に基づき、アレー観測から位相速度検出までの作業を一体化した観測・解析システムを構築したことを述べている。さらに、速度構造が既知の浅層地盤で実施された小規模アレー実験の結果に基づき、観測誤差の原因を明らかにするとともに、誤差を抑制するための解析パラメタの設定方法を示している。これは有用な知見である。

第3章では、地下構造資料が利用できる8カ所の深層坑井の近傍で実施されたアレー観測結果に基づいて、位相速度の逆解析問題の考察を中心に深部S波速度構造の高精度推定について論じている。そこでは、深部探査に必要な長周期の位相速度検出には、100m、300mおよび600m級の円形アレーの組み合わせが妥当であること、位相速度の低域側の検出限界が微動のパワースペクトルに依存することを示し、長周期微動のアレー観測法を定式化するために必要な条件を提示している。次に、微動探査法の地下構造推定に関する問題点を整理し、高い層分解能をもつ構造を一意的に導く、遺伝的アルゴリズムを用いた逆解析法を提示している。本方法によりVSPと同等の精度をもち、深部地質構造と良好に調和するS波速度構造が推定できることを示している。これらは重要な成果である。

第4章では、関東平野中央部で実施した面的密度の高い広域微動探査（東西50km、南北30km、5km間隔、61地点）について記述し、実フィールドにおける詳細な2・3次元構造を推定する具体的手法を提示するとともに、その結果が反射法と同等以上の層分解能をもち、既知の坑井地質層序に良好に整合する構造であることを示している。さらに、推定された2・3次元構造について、基盤相当層の深度分布と重力基盤深度分布との異同を詳細に検討している。これらは首都圏の地震防災を考える際の重要な知見である。

第5章は結論である。

以上要するに、本研究は、都市の地震防災や資源・環境問題を考える際に重要な、堆積平野深部の高精度3次元探査を可能にする新しい微動探査法を提示したもので、環境科学の発展に寄与するところが少なくない。

よって、本論文は博士（学術）の学位論文として合格と認める。