

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成26年 5月30日現在

機関番号：12608 研究種目：若手研究（S） 研究期間：2009～2013 課題番号：21671003 研究課題名（和文） 高精度地盤構造推定のための微動・重力・磁気の統合観測システムと同時逆解析法の開発 研究課題名（英文） A New Development of Inversion Technique to Estimate 3-D Ground Structure using Microseism, Gravity, and Magnetic Surveys 研究代表者 盛川 仁 (MORIKAWA, Hitoshi) 東京工業大学・大学院総合理工学研究科・教授 研究者番号：60273463 交付決定額（研究期間全体）：（直接経費）67,700,000円、（間接経費）20,310,000円
---

研究成果の概要（和文）：微動、重力、磁気の異なる3つの物理量を同時に用いることにより強い制約条件を与え、深い基盤の3次元形状を比較的 low コストに高い精度で推定する手法を開発した。観測の効率を高めるために、センサーおよび観測システム、ノイズ除去アルゴリズム、データ処理法を開発するとともに、3つの物理量から地盤構造モデルを推定するための同時逆解析手法を開発した。さらに提案手法を実フィールドに適用し、その妥当性を確認した。

研究成果の概要（英文）：To estimate 3-D deep structures, a new technique for survey is proposed based on simultaneous analysis of microtremor, gravity and magnetics. Observation systems and algorithm for noise reduction are developed for quick and accurate observation. Furthermore, techniques are also developed for joint inversion to analyze three different physical quantities simultaneously. The proposed techniques are applied to real fields and their adequacies are confirmed.

研究分野：複合新領域

科研費の分科・細目：社会・安全システム科学・自然災害科学

キーワード：被害予想・分析・対策、地盤構造探査

### 1. 研究開始当初の背景

堆積層の下の地盤構造、特に深い基盤の3次元形状がその地域での地震動特性に大きな影響を与えるということは、これまでの地震の事例や多くの研究から広く認知されている。したがって、地震動や地震による被害の予測を行うにあたっては、予測をしようとしている地域において、深い基盤の3次元形状を含む詳細な地盤構造に関する情報を知ることが不可欠である。

地震防災のための地震動予測の必要性の高まりに伴って、物理探査を必要とする対象領域は自ずと広くなり、都市や平野部全体といった比較的広域をカバーすることが求められるようになった。ところが、従来の物理探査手法は広域をカバーすることを前提として考えられたものは少なく、観測が需要に追いつかないという状況になりつつあった。また、物理探査の精度を高めるためにはより高価で高精度な観測装置を用いて、より長時間、より高密度の観測が必要とされるため、従来の探査手法の枠組みのなかでより安価

に、より広域をカバーするという要求に応えることは困難であった。

### 2. 研究の目的

以上のような背景のもとで、都市程度の広さの領域をより素早く、かつ精度を落とすことなく地盤構造を探査するための手法の開発は社会的要請の極めて高い研究課題である。本研究では、地盤構造に関連する物理量には互いに高い相関を有するものがあることに着目し、これまでのように一つの探査法の機能を高めるのではなく、複数の異なる物理量を同時に利用することで制約条件を増やして精度を高める、という新しい発想のもとで観測手法と解析アルゴリズムの両者を同時に考慮した物理探査手法を新たに開発することを目的としている。

物理量がもつ相関関係を活用することで地盤構造推定時の制約条件を厳しくすることができるため、ひとつひとつの物理探査手法における精度がそれほど高くなくても、結果的に得られる地盤構造のモデルの精度は

高いものとなることが期待される。そこで、ひとつひとつの観測コストがそれほど大きくない微動、重力、磁気探査の3つの記録を同時に解析することで高精度に地盤の3次元構造を推定するアルゴリズムを開発する。

一方、微動、重力、磁気探査の結果を併合処理するためには、これら3つの物理量を観測しなくてはならない。しかし、3つの物理量を個別に観測することは、かえって高コストとなってしまい、それぞれの探査法が比較的 low コストであるという長所を失ってしまう。そこで、効率よく都市程度の広さの領域での観測を実現するために、重力と磁気については、必要に応じて自動車や船舶、無人ヘリコプタなど種々の移動体にセンサーを載せ替え可能なシステムを構築する。移動体に搭載して移動しながら同時観測することで、従来法に比して観測に要する時間とコストの大幅な軽減を実現しようとするものである。また、あわせて微動アレー観測の効率化も目指す。

### 3. 研究の方法

本研究は大きくわけて新しいアルゴリズムの構築とそれに対応する新しい観測システムの開発の両面から目的を達成しようとするものである。これらは互いに不可分であることは言うまでもないが、以下ではそれぞれの項目ごとに研究方法を述べる。

#### (1) アルゴリズムの開発

本研究で用いる微動、重力、磁気探査手法のうち、物理量としてもっとも不安定でかつ、観測にもっとも時間と手間を要する微動探査手法単体での観測の高精度化と迅速化のための手法を開発する。次に、微動と重力の組み合わせ、および重力と磁気の組み合わせによる地盤構造推定手法をそれぞれ個別に検討する。さらに、観測記録に含まれるノイズが解析結果におよぼす影響を数値シミュレーションを用いて検討し、許容可能なノイズとノイズに強いセンサー配置およびアルゴリズムについて検討する。

以上の結果をふまえて磁気、重力、微動から地盤構造の推定を行うためのアルゴリズムを構築する。これを実現するために二つの手法を検討する。ひとつは、最初に重力と磁気の同時解析によって密度境界を抽出しておいて、微動アレー観測で求められた基盤深度を制約条件として重力記録を用いて地盤構造をモデル化するという2段階の逆解析法である。もうひとつは、3つの物理量についてそれぞれ構造変化に対する感度を理論的に求めて線形問題として定式化し同時に逆解析する、という手法である。特に後者は移動体による観測によって大量のデータが得られる、ということを前提とすることで安定した解を得ようとするものである。

#### (2) 観測システムの開発

微動観測によって深い構造を知るためには長周期微動を精度よく測定しなくてはならない。そのために固有周期の長い振り子を持つ大きく重いセンサーが必要で設置も難しいことが多い。微動アレー観測では多くのセンサーが必要となるため設置が容易な小型軽量のセンサーを利用できることが望ましい。ところが小型のセンサーは振り子の固有周期が短いため長周期領域での感度が低い。そこで、長周期領域でのノイズフロアの低い超高 S/N のデータロガーを開発する。

移動体に搭載する磁気センサーには既製品を利用することができるが、船舶や航空機用の重力計は水平維持装置などを含む極めて大がかりなシステムである。無人ヘリコプタへの搭載のためにはシステム全体の小型化は必須である。重力計の小型化だけでなく、種々のセンサーを用いて重力計の姿勢を測定したうえで後処理で補正できるようにし、水平維持装置などを用いないシステムとしなくてはならない。重力計の小型化のためにはデジタルサーボ回路を組み込んだフォースバランス型の加速度計を新たに開発し、姿勢や位置の計測のためのジャイロと GPS を組みこんだ一体型のシステムを開発する。

移動体に搭載した重力計の出力には移動体の振動や姿勢の動揺も含まれる。そのため、ジャイロと GPS 記録からセンサーの位置と姿勢を精度よく決定する手法の開発が必要である。また、重力計の出力については、振動や動揺成分と重力変化の振幅は5桁程度の違いがあるため、単なるフィルタ処理では正しく重力変化を抽出することができない。センサーの出力から重力変化を精度よく抽出するためのアルゴリズムもあわせて開発する。さらに、開発したシステムを用いて実フィールドで観測を行い、手法とシステムの妥当性を確認する。

### 4. 研究成果

#### (1) 研究の主な成果

本研究で得られた成果を項目別に述べる。

##### ① 微動探査手法の高度化

微動探査の観測精度の向上、特に深い構造を知るために重要な1秒以上のやや長周期領域での精度向上に大きく貢献する新しいデータ収録装置を開発した[発表論文等の論文10、以下同様]。地震計の出力とともに装置のシステムノイズを同時に記録するという「コロンブスの卵」的アイデアを採用することで安価かつ劇的に S/N を向上させ記録の精度向上を実現した。新しい収録装置によって、小型軽量の地震計でも長周期まで精度よく測定することができ、観測作業の大幅な簡略化が可能となった。また、アレーを構成しなくても2個のセンサーのみで位相速度を推

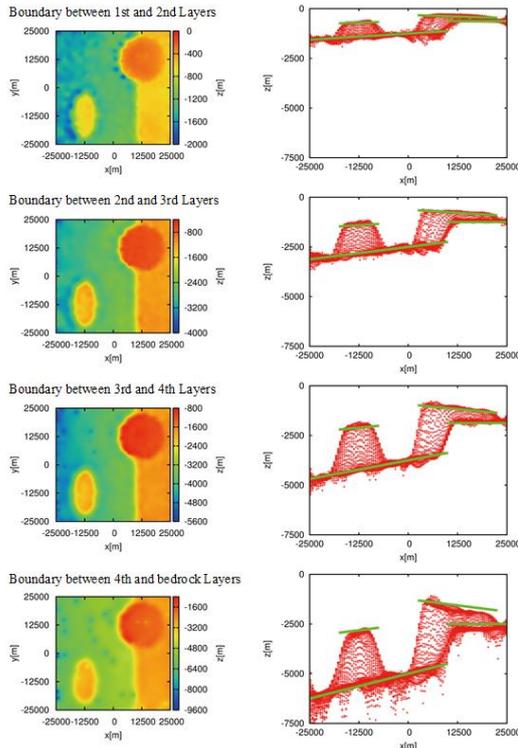
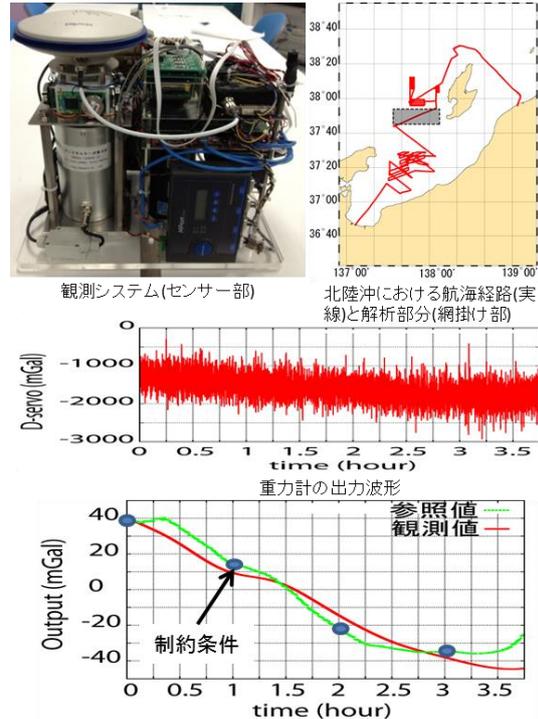


図1：微動，重力，磁気の同時逆解析によって求められた層境界の形状の例。理論に基づく数値シミュレーションによって観測データを作成し，それを使って逆解析した。図の左側は境界面の深さを色で表現したもの，右側は X 軸に境界面の位置を投影したものである。右側の直線状の線が事前に与えた境界面の位置で，ドットが推定結果である。深さによらず，両者がよく一致していることがわかる。

定可能な条件について理論的背景を誘導した[論文11]。これにより，アレー観測におけるセンサー配置に関する制約条件を取り払い，観測コストの低減に貢献できる可能性を示した。さらに直線アレーのみで原理的に位相速度を推定可能なアルゴリズムを新たに開発し，微動アレー観測の大幅なコスト削減を可能とした[発表3]。

## ②微動，重力，磁気データの組み合わせによる同時解析手法の開発

微動アレー観測による位相速度を使って基盤までの深さを推定し，それを制約条件として重力記録から地盤構造を推定する際に用いる，という組み合わせを行う手法をいくつかの地域に適用し，手法の妥当性を確認した[論文12, 13]。次に重力と磁気データを同時に解析することで，水平方向に存在する密度境界を検出する方法を提案し，地盤推定に用いる密度をエリアごとに適切に設定することでより精度の高い地盤モデルを得ることができることを確かめた[論文2, 5, 8, 発表6]。さらに，2種の物理量の組み合わせに基づく解析法をまとめることによって，地盤構造をより精度よく推定するアルゴリズムを構築した。すなわち，重力と磁気によって媒質の境界位置を検出して密度をそれぞれのエリアについて設定したのち，微動アレー



解析結果(丸で示す値が既存データから制約条件として与えられたものとして観測記録から推定した重力異常値。緑線は船上重力計による既存の記録を線形補間して求めた参照値)

図2：開発したセンサーを船舶に搭載して北陸沖を航海し，得られたデータから抽出された重力異常(フリーエア異常)。左上に見える観測システムには重力センサーに加えて位置や姿勢を測定する GPS，ジャイロ，傾斜計，センサーの状態をモニターする温度，湿度，気圧センサーが一体化されている。右上は航路と解析区間，下から2つめは重力センサーの出力，一番下は既存の船上重力計のデータを線形補間して作成した参照値と観測によって得られた結果の比較。

観測記録から得られた位相速度を用いて基盤深度を推定してこれを制約条件として重力記録から広域の3次元基盤形状を推定する，という2段階逆解析手法である[発表4]。微動アレー観測から得られる地盤構造のモデルは重力によるそれよりも浅い部分の構造を反映しやすいという特性に着目し，微動と重力それぞれから推定される地盤構造モデルを深さによって重みづけるといった新しい考え方を導入することで実現した[論文4]。

一方，微動，重力，磁気を同時に逆解析して直接地盤構造モデルを得る手法も開発した。それぞれの物理量が地盤構造に与える影響を感度としてそれぞれの物理法則から誘導し，その感度行列を用いて観測記録が説明できるような地盤モデルが得られるまで繰り返し計算によって収束させる，というアルゴリズムを採用した[一部が発表5]。先に示した2段階逆解析では多層構造の取り扱いに困難が生じる場合があるが，直接逆解析を行う場合は，多層構造であっても安定した解が得られることを確かめた。重力記録のみで多層構造を推定する場合，深さと密度の関係がトレードオフとなるため逆解析は非常に困難であった。しかし，提案手法はそれらの困

難を完全には至らないまでもある程度まで解決することができた。数値計算によってアルゴリズムの妥当性を検討した結果を図1に示す[論文投稿中のため未発表]。

### ③移動体搭載用重力観測システムの開発

移動体に搭載する従来型の重力センサーは高性能ジャイロを用いた水平維持装置や振動吸収システムを含む非常に大がかりなシステムであった。しかし、本研究では、移動体の姿勢や振動を詳細に計測し、後処理を用いて重力値を正しく抽出することで観測システムの大幅な小型化を実現した。このために、まず、移動体の振動や動揺によって出力が飽和せず、かつ、微細な重力変化に十分な感度を有する重力センサーを開発した[論文 7, 9]。デジタルサーボ回路と呼ぶまったく新しいフィードバックシステムを開発することで高い感度と広いダイナミックレンジという互いに相反する条件を高いレベルで満足するセンサーを実現した。しかし、センサーはドリフトや温度、気圧の影響から完全に逃れることはできないことも明らかとなった。

そこで、移動体の動揺などの影響とともにドリフトなどの影響をセンサー出力から分離して取り除くために、制約条件下で独立成分分析と Hilbert-Huang 変換(HHT)を用いた新しい時系列解析手法を開発した。新しい重力センサーおよび種々のセンサーを搭載した試作システムを作成し、無人ヘリコプタや船舶に搭載して実際に記録を収集し、観測システムの性能と解析アルゴリズムの妥当性を確認した[論文 3, 6, 発表 1, 2]。

上に述べたとおり、移動体に搭載したセンサーの姿勢や動揺を精度よく決定することはセンサーの空間位置の決定とともに非常に重要である。そのために、比較的安価な1周波GPSとMEMSジャイロを用いた姿勢・位置計測装置を新たに開発するとともに、その記録の解析アルゴリズムを開発した。試作したシステムを船舶に搭載して記録を収集し、開発したアルゴリズムを適用して重力変化を抽出した結果を図2に示す[論文 1]。

### (2) 得られた成果の国内外における位置づけとインパクト

2013年には国際会議(ICOSSAR 2013)および国内会議(第63回理論応用力学講演会)において本研究課題を中心としたオーガナイズドセッションを提案し、認められた。いずれのセッションでも関連の深い研究成果もあわせて発表され、活発な議論がかわされとともに国内外で注目される成果が得られたものと考えている。また、国内では技術者が参加する講演会(東京工業大学で開催している工学地震学・地震工学談話会)などで積極的に本研究の成果を紹介し、観測システム、観測手法、データ処理と解析手法が一連のパ

ッケージとして機能し得る点が特に注目された。

### (3) 今後の展望

本研究課題で設定した課題はほぼすべて解決することができた。しかし、個々の技術としては解決できていても観測システムから地盤構造推定に至る全体を一つのパッケージとしてまとめるまでには至らなかった。また、重力計のためのセンサー開発においては種々の問題とともにより高性能なセンサーの技術的可能性も明らかとなった。

地盤構造の推定は地震防災を考えるうえで国策としても重要な課題である。本研究課題の成果はこのような目的に十分に活用され得るレベルに達したと考えられ、観測システムから解析までをまとめてパッケージ化し、比較的低コストで提供するような事業化も十分に視野に入るものと考えている。今後は国内外での事業化の可能性を念頭に置きながら、実フィールドでの観測実績を積み重ねてより精度の高い地盤モデルが得られるようセンサーの改良や細かな修正を加えながら完成度を高めていく。研究期間が終了した後も、このような地道な改良こそが本研究の成果を社会に還元するという観点からも本研究の責務であると考えている。

### 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 26 件)

- ① 鈴木拓也・西宏治郎・佐伯昌之・盛川仁, 1周波GPSとMEMS IMUを用いた姿勢計測システムの精度検証, 物理探査, 査読有, (印刷中)
- ② Chen, H.-T., Tsai, Y.-Y., and Morikawa, H., “A method to estimate a 3-D ground structure using joint inversion of gravity and microtremor data,” *Safety, Reliability and Risk of Structures, Infrastructures and Engineering Systems*, (Proc. of ICOSSAR2013), 査読有, (in printing)
- ③ Tokue, S., Ogura, Y., Morikawa, H., Matsuda, S., Yokoi, I., Suda, H., Kima, S., Kusumoto, S., Noguchi T., and Komazawa, M., “Developments of airborne survey on an unmanned helicopter for quick observation of gravity and magnetism,” *Safety, Reliability and Risk of Structures, Infrastructures and Engineering Systems*, (Proc. of ICOSSAR 2013), 査読有, (in printing)
- ④ Ishida, Y., Noguchi, T., Kagawa, T., and Morikawa, H., “A study on developing subsurface structure model using

- microtremor, gravity and magnetic data,” *Safety, Reliability and Risk of Structures, Infrastructures and Engineering Systems*, (Proc. of ICOSSAR 2013), 査読有, (in printing)
- ⑤ 高橋千佳・盛川仁：重力および磁気記録の併合処理による地盤構造境界の検出法の検討, 物理探査, 査読有, Vol. 66, No. 3, 2013, pp. 167-177.
- ⑥ Khatri, P.P., Honda, R., and Morikawa, H., “Separation of gravity anomaly data considering statistical independence of source signals,” *Journal of Japan Society of Civil Engineers*, Ser.A1, 査読有, Vol. 69, No. 4, 2013, pp. I\_549-I\_558, DOI:10.2208/jscejsee.69.I\_549
- ⑦ 横井勇・小倉祐美子・須田治男・木間貞治・松田滋夫・徳江聡・盛川仁・野口竜也・石田勇介：重力測定のためのデジタルサーボセンサーの改良, 土木学会論文集A1特集号, 査読有, Vol. 69, No. 4, 2013, pp. I\_448-I\_453, DOI:10.2208/jscejsee.69.I\_448
- ⑧ Kusumoto, S., Itoh, Y., Takano, O., and Tamaki, M., “Numerical modeling of sedimentary basin formation at the termination of lateral faults in a tectonic region where fault propagation has occurred,” *Mechanism of Sedimentary Basin Formation -Multidisciplinary Approach on Active Plate Margins* (Edit. By Y. Itoh) InTech, 査読有, 2013, pp. 273-304.
- ⑨ 松尾寛子・盛川仁・松田滋夫・徳江聡・駒澤正夫・楠本成寿：フォースバランス型加速度計を用いた簡易相対重力計開発のための基礎的研究, 土木学会論文集A1特集号, 査読有, Vol. 68, No. 4, 2012, pp. I\_236-I\_243, DOI:10.2208/jscejsee.68.I\_236
- ⑩ 荒木正之・盛川仁・伊藤貴盛・谷川正真・松本敬太郎：A/Dコンバータのハイブリッド利用による広ダイナミックレンジのデータロガーの開発, 日本地震工学会論文集, 査読有, 第11巻, 第3号, 2011, pp. 59-72.
- ⑪ Morikawa, H., Iiyama, K., and Ohori, M., “A study of the stochastic properties of auto-correlation coefficients for microtremor data simultaneously observed at two sites,” *Proc. 11th International Conference on Applications of Statistics and Probability in Civil Engineering*, 査読有, 2011, pp. 2402-2409.
- ⑫ 正坂拓也・高橋千佳・駒澤正夫・陳慧慈・盛川仁：重力探査を用いた台湾新竹市における三次元地盤形状の推定, 土木学会論文集A1, 査読有, Vol. 65, No. 1, 2010, pp. 12-18, DOI:10.2208/jscejsee.65.12
- ⑬ Goto, H., Takahashi, C., Ishii, Y., Ling, S.-Q., Miyakoshi, K., Morikawa, H., Sato, Y., Sawada, S., Shingaki, Y., Suzuki, Y., Takabatake, D., Joshima, M., “Deep subsurface structure estimated by microtremors array observations and gravity surveys in Kashiwazaki area, Japan,” *Soils and Foundations*, (Report/No. 3646), 査読有, Vol. 49, No. 4, 2009, pp. 651-659, DOI:10.3208/sandf.49.651
- [学会発表] (計 88 件)
- ① 小倉祐美子・松田滋夫・横井勇・須田治夫・木間貞治・盛川仁・佐伯昌之・鈴木拓也・駒澤正夫：移動体用重力探査システムにおけるデータ解析手法に関する研究, 日本地球惑星科学連合2014年大会予稿集, STT58-P04, 2014.4/28-5/2, 横浜
- ② Morikawa, H., Ogura, Y., Tokue, S., Takahashi, C., Matsuda, S., Saeki, M., Suzuki, T., Ohsawa, E., Yokoi, I., Suda, H., Kima, S., Kusumoto, S., Noguchi, T., and Komazawa, M., “Developments of Joint Survey System and Technique of Joint Analysis for Gravity and Magnetism,” *Proc. Proceedings of the 1st AUN/SEED-Net Regional Conference on Natural Disaster*, Yogyakarta, Indonesia, January 22-23. 2014.
- ③ Zhang X.-R. and Morikawa, H., “Estimation of Rayleigh wave phase velocity using sensors in a line based on the discrete formula of the complex coherence function (CCF),” 日本地震学会2013年秋季大会予稿集, B22-02, 2013.10/7-9, 横浜
- ④ 石田勇介・野口竜也・香川敬生・盛川仁：微動・重力・磁気データを用いた地盤構造モデル推定の試み-鳥取平野における適用例-, 日本地球惑星科学連合2013年大会予稿集, SSS33-P04, 2013.5/19-24, 千葉
- ⑤ 今枝佑輔・盛川仁：重力と磁気を使った地下構造同時推定のための数値計算コードの開発, 日本地球惑星科学連合2013年大会予稿集, SSS33-P07, 2013.5/19-24, 千葉
- ⑥ Inoue, N., Subsurface structure beneath the Unzen Volcano, Shimabara Peninsula, Kyushu, Japan, based on 2D joint inversion of gravity and magnetic data, SEGJ 11th Symposium, 2013.11/18-20, 横浜

〔図書〕（計 0 件）

〔産業財産権〕

○出願状況（計 0 件）

○取得状況（計 0 件）

〔その他〕

ホームページ等

<http://quake.enveng.titech.ac.jp/airgrav/>

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

盛川 仁 (MORIKAWA, Hitoshi)  
東京工業大学・  
大学院総合理工学研究科・教授  
研究者番号：60273463

### (2) 研究分担者

なし

### (3) 連携研究者

なし

### (4) 研究協力者

本田 利器 (HONDA, Riki)  
東京大学・  
新領域創成科学研究科・教授  
研究者番号：60301248

佐伯 昌之 (SAEKI, Masayuki)  
東京理科大学・  
理工学部土木工学科・准教授  
研究者番号：70385516

楠本 成寿 (KUSUMOTO, Shigekazu)  
富山大学大学院・  
理工学研究部(理学)・准教授  
研究者番号：50338761

野口 竜也 (NOGUCHI, Tatsuya)  
鳥取大学大学院・  
工学研究科・助教  
研究者番号：20379655

井上 直人 (INOUE, Naoto)  
(一般財団法人)地域地盤環境研究所・  
地震防災グループ・研究員  
研究者番号：50378551

駒澤 正夫 (KOMAZAWA, Masao)  
(独立行政法人)産業技術総合研究所・  
地質情報研究部門・  
地球物理情報研究グループ・主任研究員

平成 22 年度より

大熊 茂雄 (OKUMA, Shigeo)  
(独立行政法人)産業技術総合研究所・  
地質情報研究部門・  
地球物理情報研究グループ・  
上級主任研究員

今枝 佑輔 (IMAEDA, Yusuke)  
東京工業大学・  
地球生命研究所  
研究者番号：50372652

松田 滋夫 (MATSUDA, Shigeo)  
クローバテック株式会社・  
代表取締役社長

横井 勇 (YOKOI, Isamu)  
株式会社 東京測振・相談役

平成 24 年度より

Huei-Tsyr Chen  
台湾国立中央大学・  
Department of Civil Engineering・教授

後藤 浩之 (GOTO, Hiroyuki)  
京都大学 防災研究所・  
地震災害研究部門・助教

坂井 公俊 (SAKAI, Kimitoshi)  
(公益財団法人)鉄道総合技術研究所・  
副主任研究員

石田 勇介 (Ishida, Yusuke)  
鳥取大学大学院・  
工学研究科・博士後期課程学生