

機関番号：13901

研究種目：基盤研究(B)

研究期間：2008～2010

課題番号：20360250

研究課題名(和文)

東海・東南海地震の広域巨大災害における構造被害データ収集のための建物強震観測戦略

研究課題名(英文)

Earthquake Response Observation of Buildings for Evaluation of Structural Damage in Large Area Caused by Tokai and Tonankai Earthquakes

研究代表者：

飛田 潤 (TOBITA JUN)

名古屋大学・環境学研究科・准教授

研究者番号：90217521

研究成果の概要(和文)：

近い将来の東海・東南海地震において予想される膨大な建物構造被害の情報を効果的に収集するために、広域・多数の建物に関する戦略的な強震観測・データ整理の体制を検討し、名古屋圏で試験稼働することを目的とした。結果として、(1)建物・地盤・地震動等の基礎データ収集・整理と相互運用ウェブ GIS による利用環境開発、(2)旧式、廉価型地震計の活用法と性能確認、(3)観測記録から建物被害を評価する方法論の構築、などの成果を得た。

研究成果の概要(英文)：

Effective earthquake observation system and Web GIS database were developed and applied for evaluation of large amount of building damage during earthquake disasters. Following major results were obtained: (1) Data on soil condition, buildings and observed records were accumulated and arranged by Web GIS. (2) Building response observation system were developed using reused sensors and low-cost equipments. (3) Method for building damage evaluation was developed using observed acceleration response.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	10,600,000	3,180,000	13,780,000
2009年度	2,400,000	720,000	3,120,000
2010年度	1,800,000	540,000	2,340,000
総計	14,800,000	4,440,000	19,240,000

研究分野：地震工学

科研費の分科・細目：建築学、建築構造・材料

キーワード：強震計、地震応答、構造ヘルスマモニタリング、構造被害、地理情報システム

1. 研究開始当初の背景

将来の南海トラフ地震による災害は広域に及び、数百万棟の建物がなんらか被害を受けることが予想されている。しかし、このような大災害では、専門家の数、時間、社会状況などの制約から、構造被害に関する全体的な調査は困難であり、また個々の建物の詳細な損傷評価も十分に行えないことが予想される。したがって、客観的な情報として強震観測体制の充実と、それに基づく効果的な建物被害評価法や被害情報収集の枠組みを早

急に検討する必要がある。

建物の強震観測は長い歴史があり、観測例やその成果も少なくない。しかし、地盤の地震観測体制が全国的に充実してきたのに対して、広域の建物被害状況を詳細に検討する観測体制は十分ではない。特に具体的な問題点として、観測対象建物が首都圏をはじめとする大都市に集中していること、大規模あるいは特殊な建物に限定され、一般的な建物の観測が少ないこと、民間建物の情報の多くは公開が困難なため、多数のデータを客観比較

しにくいこと、などが挙げられる。さらに、建物強震観測体制の整備と維持が、予算の厳しい制約を受けながら少数の技術者により個別に行われていること、従ってデータの統一かつ有効な利用が困難であることも問題である。

建物は個性が高いため、地盤強震観測における K-NET や気象庁計測震度計のような全国一律のトップダウン型整備は、容易ではない。一方で、1995 年の兵庫県南部地震以降に整備された強震観測システムが 10 年以上を経てリプレイスされ、旧システムの機材が大量に廃棄される状況になっており、これらの有効活用が望まれていた。

以上の背景から、建物強震観測の機材やデータ収集方法、データ利用環境などに関する新たなアイデアと開発・検討が必要と考えた。

2. 研究の目的

本研究は、近い将来の東海・東南海地震において、西日本の広域で予想される膨大な建物構造被害の情報・資料を最大限に収集するために、広域・多数の建物に関する戦略的な強震観測体制を検討するとともに、具体的な観測・分析機器の開発と運用を行い、名古屋圏において試験的に稼動することを目的としている。

ここで言う「強震観測体制」は、単に地震計の広域展開や強震データ収集・処理システムの開発整備にとどまらず、現状の建物強震観測が抱える制約を打破し、建物被害や耐震性に関する資料収集にむけて、建物強震観測を充実させるための多様なアイデアを展開することを意図している。

3. 研究の方法

- (1) 限られた機材・体制で広域被害を的確に捉えるための強震観測に向けて、基礎となる地盤・建物・都市の基盤データベースの整備と、相互運用ウェブ GIS による利用プラットフォームの構築を行う。
- (2) 旧式、安価の観測機材の（再）利用による低コスト観測環境の整備を行う。この際に、極力簡易な観測体制で展開する方法として、学校教員などの非専門家の協力によるスタンドアロン観測を検討し、そのためのソフトウェアや関連資料の開発を行う。
- (3) 強震観測記録から、固有周期の変化や層間変形など建物被害指標を推定するために、観測方法やデータ処理の開発検討を行う。

以上の各項目の連携により新たな観測体制を提示するとともに、実際に観測を継続的に行ってデータを蓄積する。

4. 研究成果

- (1) 地盤・建物・観測記録の基盤データ整備と GIS プラットフォーム構築

まず基本データとして、名古屋を中心に東海地域（静岡・愛知・岐阜・三重）の地震観測、地盤、建物等の基礎データを収集・整理し、相互運用に対応したウェブ GIS によりデータベース化した。図 1~3 にその例を示す。

図 1 は愛知県内の強震観測地点を示している。県・市による計測震度計やライフライン企業の観測網、大学の研究用などのデータを統合したもので、東海地域全体で約 600 地点を含んでいる。

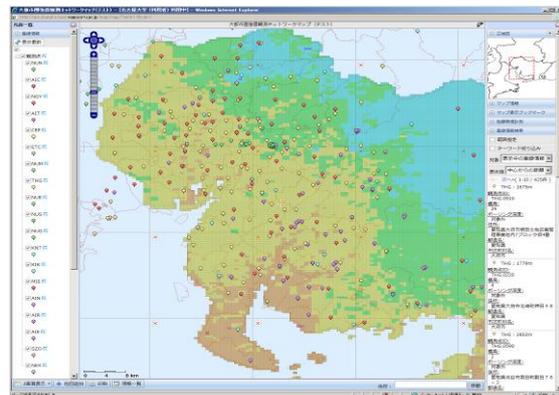


図 1 愛知県内の強震観測点分布と東海・東南海地震による予測震度マップ

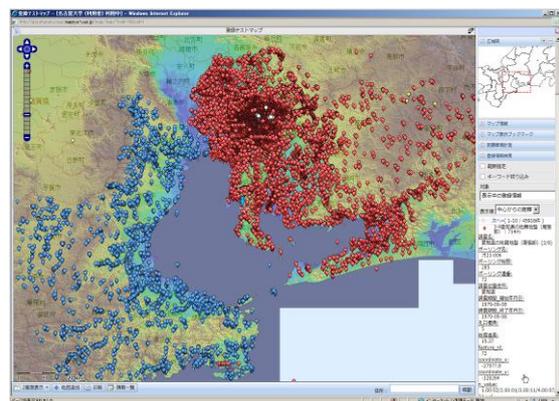


図 2(a) ボーリング位置図



図 2(b) ボーリングデータの立体表示

これらの強震観測地点情報をハザードマップなどと重ねて表示することにより、重要な地点を強震観測は網羅できているか、逆に観測結果から見た揺れの分布や被害予測との整合など、さらにそれらに基づいて、最適な観測体制の構築などの検討を行うことができる。

図 2(a)は表層ボーリング地点を地図上であらわしたものであり、図 2(b)は狭い範囲でボーリングを立体表示した例である。これらにより面的な地震動評価や観測の関連を検討することが可能になる。

図 3は県有建物について、耐震性能を示したものである。表示環境として Google Earth を用いており、ハザードマップと重ねれば、個々の建物の被害予測も概略可能である。

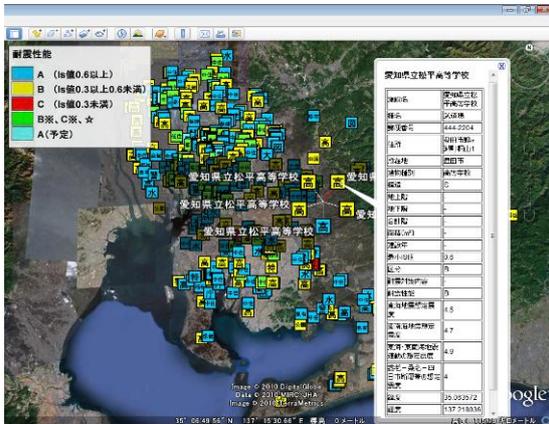


図 3 愛知県建物の耐震性分布

(2) 安価・旧式の観測機材による低コスト強震観測環境の整備

既存の観測システムの機器更新に伴って廃棄された強震計を活用することで、安価に広域の観測体制を構築することを目指す。ここでは、K-NET で使用されていた K-NET95 強震計、自治体の計測震度ネットワークで使用されていた震度計などをテストした。

図 4 に、K-NET95 と半導体センサによる小型廉価型強震計を、一般的な普及型強震計と比較して、振動台テストしている状況を示す。また観測されたスペクトルの比較を図 5 に示す。K-NET95 強震計は、当初の設置から 10 年以上が経過していたためか一部に動作不良の個体が見られたが、正常に動作するものに関しては計測特性は良好であり、一般の普及型強震計とほぼ同等である。

半導体センサーは、機種により特性が異なる場合がある。今回テストした機種に関しては、水平成分は十分な精度が確認されたものの、上下動はレベルの低い長周期側で他の強震計と差が見られた。

これらの結果に基づいて、簡易なスタンドアロン観測ができるように、電源等の改造を加えて使用することとした。



図 4 3 種類の強震計の特性テスト

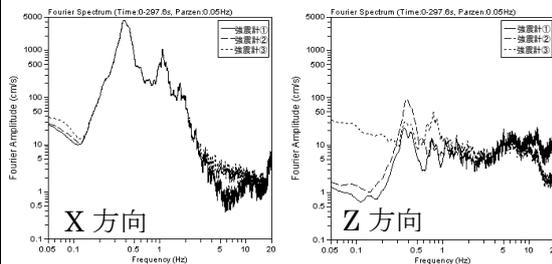


図 5 3 種類の強震計の観測スペクトル比較

(3) 非専門家の協力による強震観測体制

前項で検討したスタンドアロン観測用の強震計を用いて、コストを抑えてなるべく多くの地点を観測する手法として、現地の非専門家の協力を得る手法を検討した。たとえば高校の理科教員であれば、地学や物理の授業との関係も含めて、校舎の地震観測に関心を持ってもらえる可能性がある。また一般住宅では、居住者が地震に対して興味を持つよう誘導すれば、耐震化普及啓発などに有効である。

地震計の管理からデータの回収・送付の概念を図 6 に示す。地震発生時は協力者が PC を接続してデータを手動で回収し、電子メールに添付してサーバに送る。サーバはヘッダ等によりデータを整理し、ウェブ GIS により利用できるようにする。

地震計はネットワーク接続、時刻同期、記憶容量などに制約があってもよく、旧式あるいは安価な強震計の活用に適する。メンテナンス、データ回収と確認、メール送付を一括して行うソフトウェアを開発し、地震計とともに提供しているので、現地の協力者は専門家である必要はないが、興味をもって観測を継続するための環境の提供が重要である。図 7 はその例で、データの特性をビジュアルに表示できるソフトや、転送したデータをウェブ GIS 上で確認できる環境を提供し、教育に活用する。

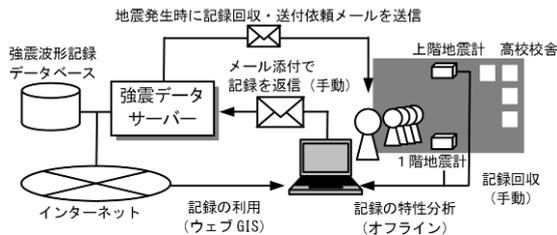


図 6 非専門家の協力による観測体制

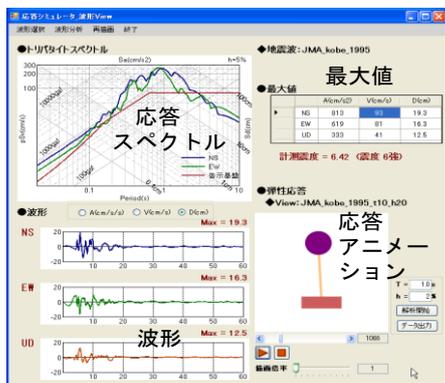


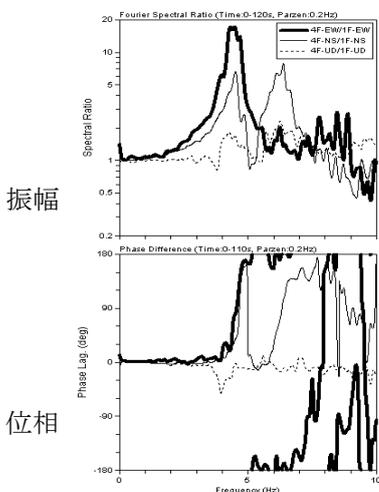
図 7 回収されたデータを用いて応答を計算しアニメーション化するツール



↑ 校舎外観

4 階床設置例→

図 8 高校校舎に設置した地震計の例



振幅

位相

図 9 時刻ずれ補正後の 4 階/1 階の伝達関数

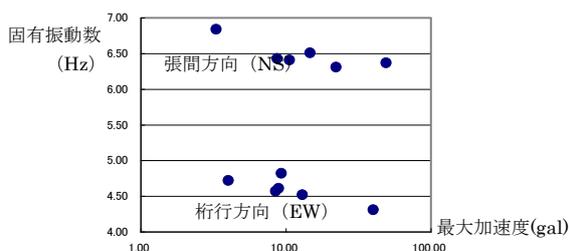


図 10 4 階/1 階の伝達関数から推定した固有振動数の変化

実際の観測は、高校の理科教員の協力で複数の校舎で行った。愛知県内の高校での観測例を図 8 に示す。4 階建 RC 造の校舎の 1 階と 4 階に地震計を設置し、約 1 年間の計測期間で 6 地震の記録が得られた。結果として、建物の上下で必ずしも時刻同期しないスタンドアロン観測でも、時刻ずれを補正することで図 9 のように、位相特性も含めて十分な精度の伝達関数が得られた。図 10 に示すように、推定された固有振動数は明確な振幅依存性を示している。なお、最大の記録は 2009.8.11 の駿河湾の地震であり、その前後で明確な周期ののびは見られない。

図 11 に一般の住宅での観測例を示す。木造 2 階建住宅の 1 階と 2 階の床に設置している。これにより住宅の固有周期やその変化、地震時の揺れの大きさなどを知ることができ、住民の耐震化啓発などへもつながるものと考えられる。

回収・メール添付の送信などを自動化したい場合のために、小型の LinuxBox による接続装置開発した (図 12)。これは平常時から定期的に地震計とネットワークにつなぎ、新しいデータがあれば直ちにダウンロードしてサーバへ転送して、メモリをクリアする機能を持つ。メモリ容量が限られている旧式の地震計で特に有効である。



図 11 木造住宅の 1 階と 2 階の観測例



図 12 Linux Box による接続装置の外観

(4) 加速度記録から構造損傷を評価する手法の検討

図 10 に示すような固有振動数の変化により、構造全体としての損傷や劣化を評価できるが、より詳細な損傷位置や損傷程度を評価するために、層間変形の評価を検討した。

E ディフェンス実験における鋼構造高層建物試験体に一般的な地震計を設置し、繰り返し大レベル加振を受けて損傷する過程を計測した。図 13 に複数回の加振による 1 次固有振動数の変化を示す。小レベルのホワイトノイズ加振と、大レベルの三の丸波加振を交互に行っており、NS と EW のそれぞれの方向で、大きな↓を示した加振により 1 次固有振動数の明確な低下が生じている。この固有振動数の変化は、構造体の一部の溶接部破断の発生に対応している。しかし、固有振動数の変化はわずか数%であり、重大な損傷を検出できるとは限らない。

図 14 に、強震計の記録から求めた層の弾塑性挙動を示す。各階の加速度と質量から慣性力を、層の上下の加速度記録を積分して層間変形を、それぞれ求めている。これより、損傷を生じた層の剛性が大幅に低下していることが評価できている。加速度記録から求めた変位は、2 階積分の際の長周期フィルタなどに注意すれば、十分な精度が得られることがわかる。

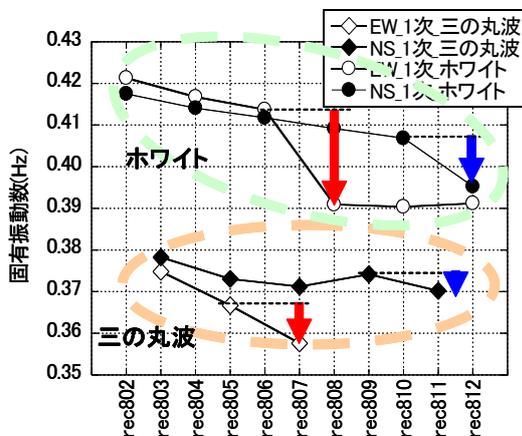


図 13 鋼構造試験体の繰り返し加振による損傷に伴う 1 次固有振動数の変化

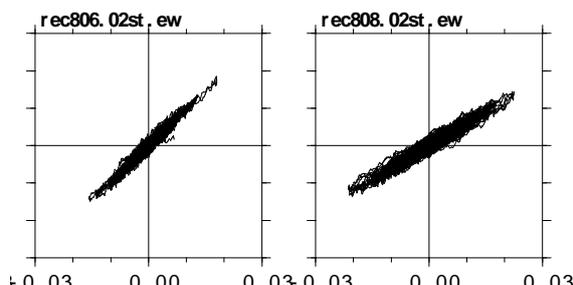


図 14 顕著な損傷を生じた層の損傷前(左)と損傷後(右)の小振幅加振の履歴ループ

以上の(1)~(4)の検討例を踏まえて、現在も多様な建物での観測を継続中であり、データの蓄積が進んでいる。2011.3.11の東北地方太平洋沖地震においても、東海地域で多数の観測記録が得られた。

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 8 件)

- ① 海野元伸、福和伸夫、飛田潤：高密度観測・強制加振実験に基づく地盤-建物連成系の立体振動性状及び履歴特性評価、構造工学論文集、査読有、Vol.57B、2011、pp.239-248
- ② 西澤崇雄、大野富男、飛田潤、福和伸夫：設計から竣工後までの長期的な品質確保のための光ファイバセンサによる高層建物の構造性能把握に関する研究、日本建築学会構造系論文集、査読有、第 75 巻 658 号、2010、pp.2247-2255
- ③ 飛田潤、福和伸夫、平田悠貴、長江拓也：普及型強震計による高層建物の応答特性と損傷のモニタリング、構造工学論文集、査読有、Vol.56B、2010、pp.229-236
- ④ 西澤崇雄、大野富男、飛田潤、福和伸夫：光ファイバセンサによる高層建物建設時の柱軸力変化の計測、日本建築学会技術報告集、査読有、第 31 号、2009、751-756
- ⑤ J. Tobita and N. Fukuwa: Ground Vibration Caused by Tunnel Construction and its Effects on Electron Microscope, Journal of Asian Architecture and Building Engineering、査読有、Vol.8, No.1, 2009, pp.267-273
- ⑥ 飛田潤、福和伸夫、西澤崇雄：光ファイバセンサによる鋼構造試験体の静的・動的柱軸変形の計測、構造工学論文集、査読有、Vol.55B、2009、pp.577-582
- ⑦ 飛田潤、福和伸夫、倉田和己：ウェブ GIS とデータ相互運用技術による強震観測記録の統合利用環境、日本地震工学会論文集、査読有、第 9 巻、第 2 号、2009、pp.51-60
- ⑧ 飛田潤、福和伸夫、佐武直紀、太田賢治、小出栄治：地盤・建物振動特性の現地簡易評価のための常時微動計測分析システムの開発、日本建築学会技術報告集、査読有、第 29 号、2009、pp.61-64

[学会発表] (計 24 件)

- ① J. Tobita and N. Fukuwa: New Approach for Strong Motion Observation using Low-cost Sensors in collaboration with Non-professional Partners, 8th International Conference on Urban Earthquake Engineering, 2011.3.8, 東京工業大学
- ② 海野元伸、飛田潤、福和伸夫、小島宏章：

- 高密度観測・強制加振実験に基づく地盤-建物連成系の振動モデル構築、第13回日本地震工学シンポジウム、2010.11.20、つくば国際会議場
- ③ 飛田潤、福和伸夫：強震計を用いた高層建物の損傷評価と構造ヘルスマonitoring、第13回日本地震工学シンポジウム、2010.11.19、つくば国際会議場
- ④ 西澤崇雄、大野富男、飛田潤、福和伸夫：設計時から竣工後までの高層建物の品質確保・性能把握のための光ファイバセンサーによる構造モニタリング、第13回日本地震工学シンポジウム、2010.11.19、つくば国際会議場
- ⑤ 今枝賢志朗、飛田潤、福和伸夫：一般協力者との連携による強震観測体制「Pネット」の観測状況と活用方策、日本建築学会大会、2010.9.10、富山大学
- ⑥ 海野元伸、小島宏章、飛田潤、福和伸夫：高密度観測・強制加振実験に基づくPCaPC造建物の立体振動性状に関する研究、日本建築学会大会、2010.9.10、富山大学
- ⑦ 西澤崇雄、大野富男、飛田潤、福和伸夫：不整形超高層建物の構造ヘルスマonitoring～建物加振実験の柱変動歪に関する考察～、日本建築学会大会、2010.9.10、富山大学
- ⑧ J. Tobita, N. Fukuwa and Y. Hirata: Structural Damage Evaluation of High-Rise Buildings Subjected to Long-Period Earthquake Shaking by Use of Strong Motion Accelerographs and Fiber Optic Sensors, 5th World Conference on Structural Control and Monitoring, 2010.7.14, 京王プラザホテル
- ⑨ T. Nishizawa, T. Ohno, J. Tobita and N. Fukuwa: Measurement Using Optical Fiber Sensors in order to Ensure and Keep Track of the Quality and Performance of Buildings from the Design to Post-Completion Stages, 2010.7.14, 京王プラザホテル
- ⑩ 平田悠貴、飛田潤、福和伸夫：加速度計の記録に基づく高層建物の層間変形と損傷の評価、日本建築学会東海支部研究発表会、2010.2.21、名古屋大学
- ⑪ 飛田潤、福和伸夫、西澤崇雄、平田悠貴：強震計と光ファイバセンサーによる鋼構造試験体の地震応答と損傷の評価(その1)(その2)、日本建築学会大会、2009.8.26、東北学院大学
- ⑫ 西澤崇雄、大野富男、飛田潤、福和伸夫：不整形超高層建物の構造ヘルスマonitoringのための建物重量評価、日本建築学会大会、2009.8.26、東北学院大学
- ⑬ 廣野衣美、飛田潤、福和伸夫、護雅史、小島宏章：立体振動分析支援アニメーションツールを用いた隣接建物振動特性の検討、日本建築学会大会、2009.8.26、東北学院大学
- ⑭ 飛田潤、福和伸夫、西澤崇雄：光ファイバセンサーによる高層建物試験体の静的・動的な柱変形の計測、日本建築学会東海支部研究発表会、2009.2、岐阜市
- ⑮ 飛田潤、福和伸夫：旧型強震計の活用と一般観測協力者との連携による強震観測体制「Pネット」の展開、日本地震工学会大会、2008.11、仙台市
- ⑯ Tobita, J., Fukuwa, N., Mori, M., Sakaue, H., Takahashi, H., Hanai, T: WebGIS simulator for promotion of seismic retrofitting and community disaster mitigation activities, 14th World Conference on Earthquake Engineering, 2008.10, 北京
- ⑰ Mori, M., Fukuwa, N., Tobita, J.: Influence of Seismometer Foundation, Adjacent Building and Surface Ground Condition on Strong Motion Records, 14th World Conference on Earthquake Engineering, 2008.10, 北京
- ⑱ 飛田潤、福和伸夫：高層建物の強震応答と損傷のモニタリング、日本建築学会大会、2008.9、広島大学
- ⑲ 西澤崇雄、大野富男、飛田潤、福和伸夫、護雅史、小島宏章：不整形高層建物の建設時観測に基づく柱歪・振動特性変化に関する研究(その1)(その2)、日本建築学会大会、2008.9、広島大学
- ⑳ 河本悠歩、護雅史、福和伸夫、飛田潤：地震観測記録に及ぼす隣接建物の影響、日本建築学会大会、2008.9、広島大学
- [その他]
ホームページ等
<http://www.sharaku.nuac.nagoya-u.ac.jp/>
6. 研究組織
- (1)研究代表者
飛田潤 (TOBITA JUN)
名古屋大学・大学院環境学研究科・准教授
研究者番号：90217521
- (2)研究分担者
福和伸夫 (FUKUWA NOBUO)
名古屋大学・大学院環境学研究科・教授
研究者番号：20238520
- 護雅史 (MORI MASAFUMI)
名古屋大学・大学院環境学研究科・准教授
研究者番号：40447842
- 小島宏章 (KOJIMA HIROAKI)
名古屋大学・大学院環境学研究科・助教
研究者番号：40402557