

平成 30 年 6 月 20 日現在

機関番号：34416

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2016～2017

課題番号：16K12848

研究課題名(和文) 強震観測記録と地盤情報を融合した広域かつ即時的な地震動増幅特性の予測法

研究課題名(英文) Development of the real time prediction method of site amplification combining seismic strong motion records and geotechnical database

研究代表者

飛田 哲男(Tobita, Tetsuo)

関西大学・環境都市工学部・准教授

研究者番号：00346058

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,700,000円

研究成果の概要(和文)：地震後短時間に被災程度を予測できる次世代型地震防災システムの構築を目的とし、地震動増幅特性について高精度かつ即時的な予測を行うための技術的検討を行った。その結果、上記システムが実現可能であることを示した。成果と問題点は以下のとおりである。(1)地震計から出力されるデータを即時的に用いた1次元地震応答解析は可能であるが、現段階では、1台の計算機で1地点のみの解析に限られる。(2)強震記録と地盤情報データベースを用い、大阪平野を対象に広域的な地震応答解析を実施したが、今回用いた解析法による地震増幅率と既往の研究成果には有意な差が認められる。多点即時解析を行うための基盤構築が今後の課題である。

研究成果の概要(英文)：Aiming at developing the real time prediction method of site amplification in wide area, nonlinear site response analysis, an existing geotechnical database and seismic strong motion records are combined on Microsoft Excel based program. Major achievement and issues are as follows: (1) Method of real time simulation of 1D site response analysis is developed. However, number of analysis is limited to one per a PC. (2) Results of 1D site response analysis conducted for Osaka plane showed difference on site amplification factor from existing ones. After those issues being solved, real time earthquake simulation in wide area shall be made.

研究分野：地盤地震工学

キーワード：地震災害 動的応答 数値解析

1. 研究開始当初の背景

既往の地震観測網による観測データは、震源位置の特定、緊急地震速報、津波警報の発令に活用されている。また、K-NET (防災科学研究所) などの強震観測網による観測データは、地震動の伝播特性、ローカルサイト特性の把握など、強震動地震学から地震工学まで広く活用されており、耐震工学に関する研究にとって不可欠な地位を占めるに至っている。しかし、これらの強震観測点は高密度とはいえず、数キロから数十キロ離れて設置されているため、観測点間の地盤震動レベルを直接知ることはできない。このため距離減衰式や浅部地盤構造データ等を用いて強震観測記録を補完しつつ震動レベル、被災程度の予測がなされているのが現状である<sup>1,2)</sup>。現在、インターネットを介して配信されている強震観測記録は、構造物の事前の設計段階、あるいは地震後の被害分析のための貴重なデータと位置付けられているが、その即時性を活かした被災予測等には十分に活用されていない。

2. 研究の目的

本研究では、常時の地盤震動の監視から地震後短時間に特定地点の地震動と被災程度を予測できる次世代型地震防災システムを構築し、地震防災上重要な指標のひとつであり、局所的な地盤構造の影響を強く受けるとされる地表付近の地震動増幅特性について、高精度かつ即時的な予測を目指す。この目的を達成するため、(1)K-NETをはじめとする高密度地震観測網から得られる地震観測記録及び(2)近年整備されつつある地盤情報データベースと(3)地震応答解析法の三者を同時かつ即時的に用いる (図1)。

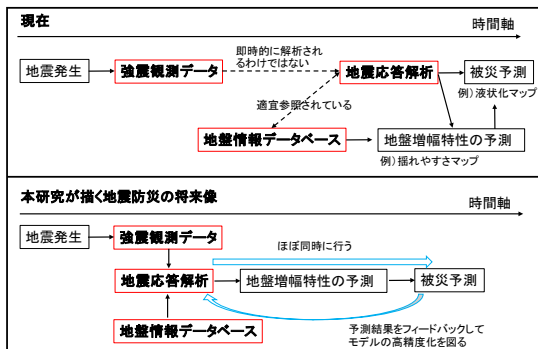


図1 時間軸で見た現在の強震データの活用方法と、本研究が目指す即時被災予測システム

3. 研究の方法

地震計のデータを即時的に取得し、リアルタイムに地震応答解析を行うことのできるシステムを開発する。さらに、大阪平野における既存の地盤情報データベースと本申請者が開発に携わった1次元地震応答解析法を組み合わせ、大阪平野の地震動増幅特性を計算し、既往の揺れやすさマップと比較検討す

る。

4. 研究成果

(1) 非線形地盤応答解析法を用いたリアルタイム地盤震動予測

ここでは、非線形地盤応答解析法を用いて、リアルタイムに地表面での地震応答倍率を算出することを試みる。手順は、①あらかじめ非線形地盤応答解析プログラムに地盤情報(本研究では1地点のみ)を入力しておく。②地震計による加速度時刻歴をパソコンで取得する。③データを取得したパソコン上で解析プログラムを立ち上げておき、取得した加速度データを連続的に解析プログラムに入力することで、地表面での応答加速度を即時に計算する。

本研究で重視する即時性、すなわち地震計測と解析実行の2つをタイムラグなしに行うプラットフォームを構築するため、Microsoft ExcelのVBAマクロを活用した。即自解析の大まかな流れは図2に示すフローチャートのとおりである。

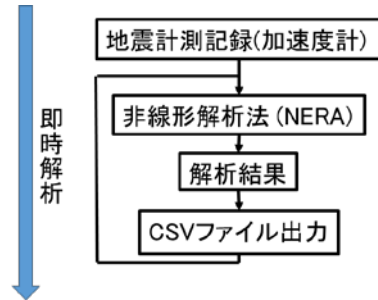


図2 即時応答計算のフローチャート

以下、地震記録、非線形解析法(NERA)について説明する。

(a) 地震計(加速度計)

本研究では、小型加速度計<sup>6)</sup>(図3)を使用した。これをパソコンとUSB接続することで3成分の加速度時刻歴が得られる。この加速度データはCSV形式で出力される。



図3 小型加速度計<sup>6)</sup>本体

(b) 非線形解析法(NERA)<sup>7)</sup>

本研究に用いる解析手法は、多曲面モデルを構成則とする有限差分解析法である(Nonlinear Earthquake Response Analysis, 以下ではNEARと称する)<sup>7)</sup>。本手法は数値積

分法として陽解法を用いるため即時的解析を実行することができる。NERAはExcelをインターフェイスとして用いており、必要な情報(地盤情報、地震記録)を各ワークシートに入力することにより、応答加速度や応答スペクトルを算出することができる。

(c) マクロの作成

加速度データを即時的に解析するため、図2のフローチャートに沿ってマクロを作成する。まず、加速度計から出力される約3秒間の加速度データをNERAに取り込む。解析はこの3秒間についてのみ行う。解析終了とともに、時刻、入力加速度と地表面加速度と増幅率が記録されたCSVファイルを出力する。このように、加速度計の出力データを数値解析プログラムに読み込ませることにより、ほぼ即時的な解析が可能であることを確認した。ただし、現段階では、上で述べたように3秒ごとの断続的な解析にとどまっている。この点については、今後改良が必要である。

(d) 解析結果の例

圧縮空気式振動台の上に加速度計を設置し、1Hzの周期で加振し即時解析を行った。解析対象とする仮想地盤(図4)は、地表面から6m付近に軟弱な粘土層がある全層厚20mの地盤である。加速度計のサンプリング周波数は20Hz(0.05s)とした。この時刻歴データに対し、解析では1/20秒間をさらに1/105に分割した時間間隔で計算を行った。これは、解析に用いる数値積分の安定性のためである。振動台上で計測された入力加速度時刻歴の12秒までを図5に示す。この範囲における最大加速度振幅は約0.15Gである。ここで、Gは重力加速度( $G=9.8m/s^2$ )である。

Layer Number	Soil Material Type	Thickness of layer (m)	Maximum shear modulus $G_{max}$ (MPa)	Total unit weight (kN/m <sup>3</sup> )	Shear wave velocity (m/sec)	SPT N	Soil type
Surface	1	1.0	30	15.0	140	6	S
2	1	1.0	30	15.0	140	7	S
3	3	1.0	30	15.0	140	59	S
4	3	1.0	111	15.0	270	60	S
5	6	1.0	111	15.0	270	14	C
6	4	1.0	111	15.0	270	1	C
7	5	1.0	198	15.0	360	5	C
8	6	1.0	198	15.0	360	28	C
9	6	1.0	198	15.0	360	99	C
10	6	1.0	233	15.0	390	99	C
11	6	1.0	233	15.0	390	99	C
12	6	1.0	413	15.0	520	15	C
13	6	1.0	413	15.0	520	11	C
14	5	1.0	257	15.0	410	8	C
15	5	1.0	257	15.0	410	7	C
16	9	1.0	257	15.0	410	99	G
17	9	1.0	257	15.0	410	99	G
18	7	1.0	257	15.0	410	15	G
19	8	1.0	257	15.0	410	40	G
Bedrock	9	1.0	257	15.0	410	99	G

図4 解析に用いた地盤モデル。Soil type : Sは砂、Cは粘土、Gはレキを表す。

計算された地表面の加速度時刻歴(図6)には、データが欠損している箇所(例えば、4秒付近)がみられるが、これは解析プログラムの設定上、出力される応答加速度の初期値が0とされているためであり改良が必要である。

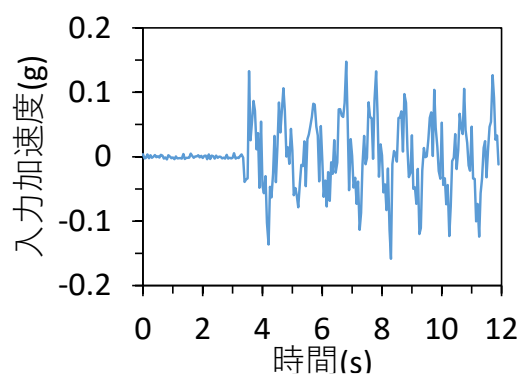


図5 振動台上で計測された入力加速度時刻歴(入力1Hz, サンプリング20Hz)

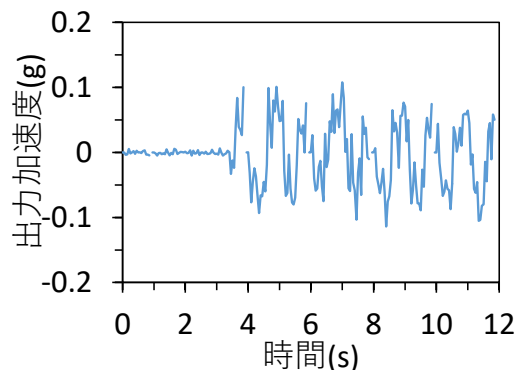


図6 図5に示す加速度を図4のBedrockに入力した時の地表面の加速度時刻歴

即時解析の安定性を検討するため、振動台の加振周波数を5Hz、サンプリング周波数を200Hzとし同様に解析したところ、入力加速度の最大振幅が約2.0Gであるのに対し、地表面加速度は不自然な応答を示し、約0.3Gと大きく減衰した。原因としては、即時解析の処理が追いついていないことなどが考えられる。このほかの問題として、即時解析が行えるのは1地点に限られるという問題がある。これは、計算機の性能を上げることと解析プログラムを改良することで解決できる。また、今回検討した中で、データの掃き出し間隔を3秒よりも短くすると、地盤条件によっては解析が実行できない場合があった。このようなプログラム側での処理の限界や条件なども今後整理し、検証・改善する予定である。

(2) 地盤情報データベースを用いた1次元非線形地盤応答解析

本研究で用いる1次元非線形地震応答解析法の妥当性を検証し、今後展開すべき方向を明らかにするため、大阪平野における揺れやすさマップとの比較を行った。解析には、関西圏地盤情報データベース<sup>8)</sup>を利用し、2016年熊本地震、2011年東北地方太平洋沖地震の観測記録を入力した。

(3) 地盤情報データベース

関西圏地盤情報ネットワーク(KG-NET:



Kansai Geo-informatics Network)による関西圏地盤情報ライブラリーの地盤情報データベース<sup>8)</sup>を使用した。同データベースには、国土地理院が発行する数値地図の5次メッシュ(250m×250m)に対し、メッシュ内のボーリングデータから抽出された平均的な地盤情報データが与えられている。公開されている地盤情報は、土質分類、 $N$ 値、単位体積重量、細粒分含有率の深度分布である。本研究では大阪平野全域の内、図7に赤色網掛けで示す3806地点について地盤情報を取得し解析プログラムに入力した。

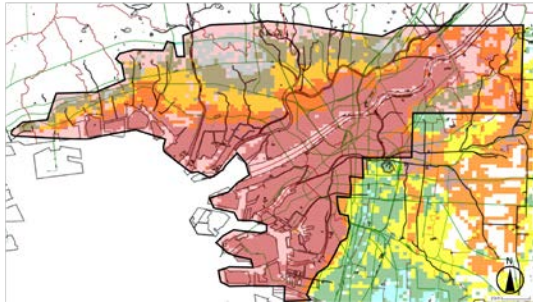


図7 関西地盤情報ライブラリー<sup>8)</sup>に保存されている深度分布図と本研究で対象とする範囲(赤色網掛け)

データベースにS波速度が掲載されていない場合には、太田・後藤(1976)<sup>9)</sup>による $N$ 値とS波速度に関する次式を用いて推定した。

$$V_s = 69N^{0.17}h^{0.2}F_1F_2 \quad (\text{m/s}) \quad (1)$$

ここで、 $V_s$ : S波速度、 $N$ :  $N$ 値、 $h$ : 地表面からの深さ(m)である。用いる地盤情報はすべて沖積層であるため $F_1=1.0$ とし、 $F_2$ については、太田・後藤による土質区分に従う。同ライブラリーには、砂質土の詳細が記されていないため、道路橋示方書を参考に $N$ 値から砂の密度を推定し $F_2$ の値を設定した。

地盤情報データベースから速度振幅の応答倍率を求めるにあたり、地震増幅度との相関が高いとされている表層30mの平均せん断波速度AVS30(例えば<sup>10)</sup>)を利用した<sup>10)</sup>。関西圏地盤情報ライブラリーの情報には、深さが30mまでの情報が示されていないデータがある。そこで、30mまで最下端の情報が続くと仮定し、神野ら<sup>11)</sup>による既往の研究の関係式

$$AVS30 = 19.5 + 1.13 \times AVS20 \quad (2)$$

を用いてAVS30を推定した。また、NERAにより算出された地震増幅度と、次式(3)に示す藤本・翠川<sup>12)</sup>によるAVS30と地震増幅度との比較も行った。

$$\log AF_{PGV} = -0.852 \cdot \log(AVS(30)/600) \quad (3)$$

ここに、 $AF_{PGV}$ は地震増幅度である。

#### (4) 地震動記録

ここでは、2016年熊本地震(図8)を用いた解析結果について示す。また、記録された加速度データのうち、解析に使用したのは

K-NET(KMM005)の15秒から34.99秒の区間である。この地震動記録は地表面に設置されている地震計により計測されたが、NERAによる解析では基盤波として入力する。

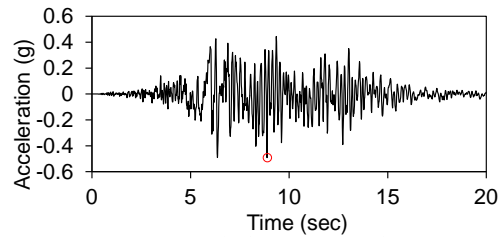


図8 2016年熊本地震(K-NET: KMM005)

#### (5) 計算・解析結果

図9は、QGIS<sup>14)</sup>を用いて、解析範囲の地盤情報の最下端の深度をプロットしたものである。これによると、沿岸部、淀川周辺では最下端深度が深く、北部に行くほど浅くなっていることがわかる。

図10は、AVS30の分布をプロットしたものである。同図より、沿岸部、淀川周辺でAVS30が100-150(m/s)と、比較的小さい値をとっていることがわかる。解析範囲の北部と上町台地ではAVS30が200(m/s)以上の地点が多くみられる。紙幅の都合で図には示さないがJ-SHISによるAVS30では、北部と上町台地でAVS30が300(m/s)程度、沿岸部と淀川周辺では200(m/s)程度である。KG-NETのAVS30がJ-SHISのものより、沿岸部において50-100(m/s)程小さい値を示している。

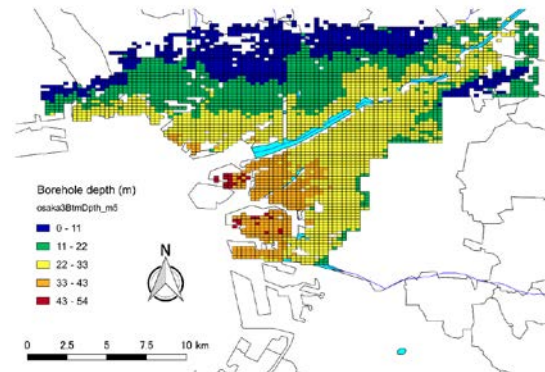


図9 関西圏地盤情報ライブラリーによる最下端深度分布<sup>8)</sup>

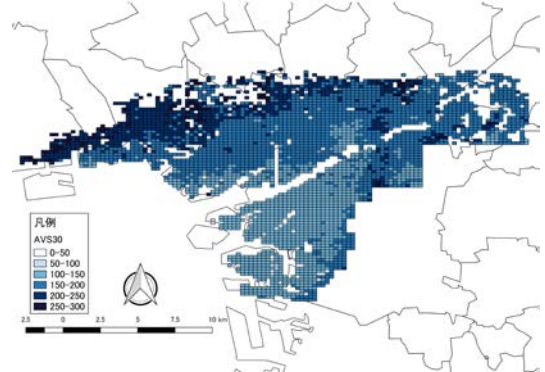


図10 関西圏地盤情報ライブラリーのデータから式(1)(2)を用いて推定されるAVS30の分布<sup>8)</sup>

次に、熊本地震を入力したときの解析結果について述べる。図 11 は、NERA による解析から得られた地震速度応答倍率の分布である。図 12 は AVS30 から求めた地震応答倍率 (AF\_PGV) の分布である。さらに、図 13 は J-SHIS による地震応答倍率である。

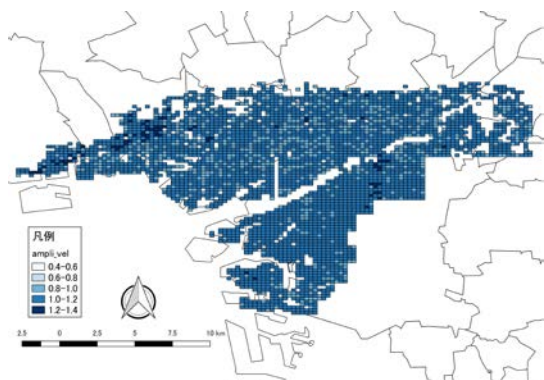


図 11 数値解析(NEAR)による地震応答倍率の分布

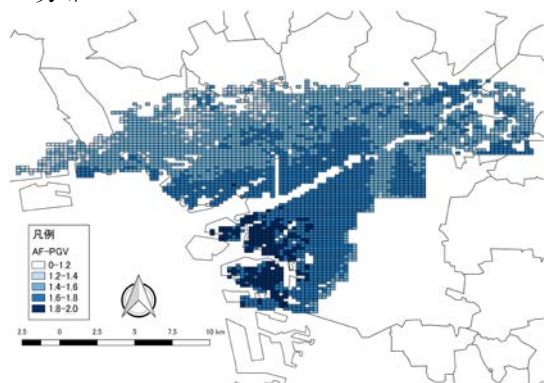


図 12 AVS30 から求めた地震応答倍率の分布

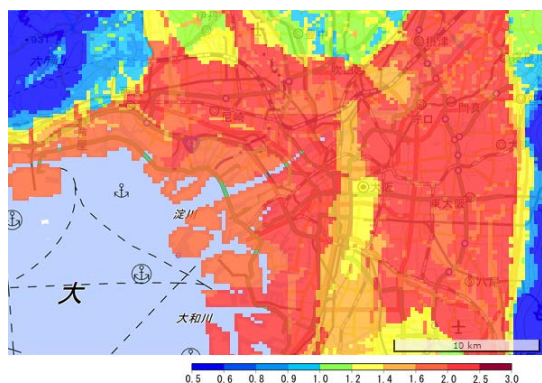


図 13 J-SHIS による地震応答倍率<sup>15)</sup>

解析による地震応答倍率の分布 (図 11) は、AVS30 から推定される応答倍率 (図 12) と J-SHIS の結果 (図 13) と比較して、全体的に小さく、全域にわたってフラットな応答倍率を示していることがわかる。AF\_PGV は AVS30 をもとに計算しているため両者の対応は良い。

しかし、数値計算結果との対応に問題が認められたため、この点について平成 29 年度に詳細に検討することとなった。その結果、

数値解析に用いたせん断剛性のひずみ振幅依存曲線 ( $G-\gamma$  曲線) が解析結果に与える影響が大きいことが分かった。現段階では、 $N$  値と土質区分を参照して、砂と粘土については  $N$  値に応じて  $G-\gamma$  曲線を 3 パターンで与えたが、拘束圧や地下水位に応じて、このパターンを見直す必要がある。また、地震動と応答倍率の関係についても検討したが、結論には至っていない。

#### まとめ

本研究の目的は、常時の地盤震動の監視から地震後短時間に特定地点の地震動と被災程度を予測できる次世代型地震防災システムを構築することである。本研究では、地震防災上重要な指標である地震動増幅特性について、高精度かつ即時的な予測を行うための基礎的な技術的検討を行い、上記システムが実現可能であることを示した。しかし、依然として以下のような問題点が明らかになった。

- 1) エクセルのマクロを活用し即時的な 1 次元地震応答解析が可能であるが、現在、1 台の計算機で 1 地点のみの解析に限られる。
- 2) 2011 年東北地方太平洋沖地震と 2016 年熊本地震で観測された強震記録を用い、大阪平野を対象に地震応答解析を実施したところ、今回用いた解析法による地震増幅率と既往の研究結果に有意な差があることを確認した。
- 3) 即時解析と地盤情報データベースを結び付け、多点即時解析を行うためのプラットフォームを構築することが今後の課題である。

上記問題点を克服することは容易ではないが、今後も研究を継続することで、近い将来、最終目的を達成できる。

#### <引用文献>

- 1) 防災科学研究所ホームページ <http://www.kyoshin.bosai.go.jp/kyoshin/> (2017/2/10)
- 2) 防災科学技術研究所ホームページ <http://www.hinet.bosai.go.jp/?LANG=ja> (2017/2/10)
- 3) 気象庁ホームページ <http://www.data.jma.go.jp/svd/eqev/data/kyoshin/kaisetsu/> (2017/2/10)
- 4) 総務省消防庁, (2004). -自治体が設置した震度計の設置環境調査結果 -
- 5) 長屋和宏・片岡正次郎・日下部毅明・松本幸司, 2015: 震後対応における意思決定を支援する即時震害推測システムの開発, Vol.72, No.4, pp.966-974.
- 6) 地層科学研究所, (2012). 超小型加速度計『Geo-Stick』.
- 7) Bardet, J. P. and Tobita, T. (2001). “NERA: A computer program for Nonlinear Earthquake Site Response Analysis of Layered Soil Deposits.” Report submitted to the

Department of Civil Engineering, University of Southern California.

- 8) 関西圏地盤情報ネットワーク「KG-NET」, <http://www.kg-net2005.jp/> (2017/1/15)
- 9) 太田裕・後藤典俊(1976). S波速度を他の土質的指標から推定する試み,物理探鉱, 29, 31-41.
- 10) 司宏俊・翠川三郎(1999). 断層タイプおよび地盤条件を考慮した最大加速度の距離減衰式, 日本建築学会構造系論文集, No.523, 63-70.
- 11) Kanno, T., Narita, A., Morikawa, N., Fujiwara, H. and Fukushima, Y. (2006). A new attenuation relation for strong ground motion in Japan based on recorded data, Bull. Seism. Soc. Am., Vol.96, 879-897.
- 12) Midorikawa, S., Mastuoka, M. and Sakugawa, K. (1994). Site effects on strong-motion records observed during the 1987 Chiba-ken-toho-oki, Japan earthquake, 9th Japanese Earthquake Engineering Symposium, E085-E090.
- 13) Kameda, H., Sugito, M., and Goto, H. (1982). Microzonation and simulation of spatially correlated earthquake motions, 3rd International Microzonation Conference, Seattle, Vol. III, 1463-1474.
- 14) QGIS. (2016) QGIS Development Team.
- 15) J-SHIS (Japan Seismic Hazard Information Station), <http://www.j-shis.bosai.go.jp/>(2017/2/2)

#### 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 0 件)

[学会発表] (計 0 件)

[図書] (計 0 件)

[産業財産権]

○出願状況 (計 0 件)

名称：  
発明者：  
権利者：  
種類：  
番号：  
出願年月日：  
国内外の別：

○取得状況 (計 0 件)

名称：  
発明者：  
権利者：

種類：  
番号：  
取得年月日：  
国内外の別：

[その他]  
ホームページ等

6. 研究組織  
(1) 研究代表者  
飛田 哲男 (TOBITA, Tetsuo)  
関西大学・環境都市工学部・准教授  
研究者番号：00346058

(2) 研究分担者  
( )

研究者番号：

(3) 連携研究者  
( )

研究者番号：

(4) 研究協力者  
( )