

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 8 日現在

機関番号：24402

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2014～2016

課題番号：26820192

研究課題名（和文）地盤調査中に土中で生じる音を利用した住宅地盤の土質判定手法の開発

研究課題名（英文）Development of soil classification method for residential ground using friction sound generated during ground investigation

研究代表者

山田 卓 (YAMADA, Suguru)

大阪市立大学・大学院工学研究科・准教授

研究者番号：70451789

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 2,900,000円

研究成果の概要（和文）：地盤調査中に地中で生じる音を利用した土質判定手法を構築することを目的として、大型動的コーン貫入試験（SRS）のトルク計測中に土中で生じる貫入コーンと周辺地盤の摩擦音を計測した。また、SRSのトルク計測状態を模擬した模型実験を実施し、摩擦音に与える種々の影響を検討した。砂質土を用いた模型実験の結果、摩擦音の音圧レベルは平均粒径、細粒分含有率、密度、拘束圧の影響を受けることがわかった。実地盤における摩擦音計測結果を基に摩擦音の音圧レベルと地盤の細粒分含有率の関係式を作成して液状化判定を実施した結果、個々の地盤に対しては標準貫入試験結果に基づいた液状化判定と同等の液状化安全率を得ることができた。

研究成果の概要（英文）：The friction sound of a penetration cone and surrounding soil was measured by Swedish Ram Sounding (SRS) with aim to develop a new evaluation method of the soil classification based on the acoustic properties of the friction sound generating in the ground during soil investigation. Further, a series of model test simulating a torque measuring condition in SRS to investigate effects of grain size as well as stress conditions on friction sound. It was discovered from the model tests that the sound pressure level (SPL) of the friction sound of sandy soil was affected by the grain size which are the fines content and the average grain size, the density of soil and the overburden pressure. An empirical model to evaluate a fines content from SPL was developed based on results of in-situ experiment, then the liquefaction assessment was tried. The calculated liquefaction potentials indicated reasonable value in comparison to that was evaluated from SPT-N value which is a conventional method.

研究分野：地盤工学

キーワード：地盤調査 液状化判定 地盤防災 住宅地盤 液状化 コーン貫入試験 細粒分含有率 粒度

1. 研究開始当初の背景

2011年東北沖太平洋地震による住宅地の液状化被害を受けて宅地の液状化対策の需要が高まっている。住宅等の構造物の基礎地盤に液状化対策を実施する際には、事前に対象地盤の液状化に対する危険度を評価する必要がある。ここで、地盤の液状化危険度の判定を行うことを「液状化判定」といい、液状化判定を行うためには、対象地盤を構成する土の分類（粒度）に関する情報が必要である。また、土の粒度を求めて土を分類することを「土質判定」といい、土質分類はボーリングマシンを使って実地盤から土試料を採取（サンプリング）し、土の粒度試験によって判別するのが一般的である。しかしその費用は高額であり、個人が負担することは難しいため、個人宅地でボーリング調査が行われることは殆どない。また、宅地向けの地盤調査は安価ではあるが、簡易な方法であるため詳細な土質分類の判定ができない。このような理由によって、個別の宅地に対する液状化の危険度判定ができないのが現状である。想定大地震から国民の財産である宅地を護るためにも個別の住宅地を対象とした液状化判定技術を開発することは緊急の課題である。

2. 研究の目的

宅地向けの簡易的な地盤調査技術を用いて、土試料採取を必要としない「音を利用した土質分類の判定」による地盤の液状化危険度判定を実現するために、地盤調査中に土中で生じる土と金属の摩擦音の音響特性から土の分類（細粒分含有率）を推定する手法を構築する。

3. 研究の方法

本研究では、宅地向け地盤調査の従来技術のうち、大型動的コーン貫入試験（Swedish Ram Sounding, SRS）を対象とした。SRS試験では、調査の過程で地盤の硬さを表す指標である N_d 値を計測する深度毎にロッドの周面摩擦を補正するためにトルク力を計測する。トルク計測時は貫入打撃音がしないので音の計測に最適なタイミングである。したがって、本研究ではマイクを内蔵した貫入コーン用いて、SRS試験のトルク力計測時にコーンと土の摩擦音を計測することを前提として、SRS実機を用いた実地盤における摩擦音計測実験およびSRSによる摩擦音計測状態を再現した模型装置実験を実施し、摩擦音の音圧レベル（Sound pressure level, SPL）と地盤の粒度の関係を調べた。本研究で用いたSRS試験装置およびマイク内蔵型SRS貫入コーンを図-1, 2にそれぞれ示す。

4. 研究成果

(1) SRS実機を用いた実地盤の摩擦音計測実験

大阪市住之江区泉、大阪市西淀川区中島、



図-1 SRS 試験装置



図-2 SRS 用マイク内蔵コーン

佐賀県唐津市原、千葉県浦安市港および千葉県香取市の5カ所の実地盤で計測されたSRSコーンと地盤の摩擦音のSPLと粗粒分含有率（ここでは100%から細粒分含有率 F_c を引いた値で表示している）の関係を図-3に示す。図より、粗粒分含有率が高いほどSPLが大きい全体的な傾向が認められるが、同一の粗粒分含有率に対するSPLの値にはばらつきがある。図-4にSPLと自然含水比 w_n の関係を、図-5にSPLと平均粒径 D_{50} の関係を示す。唐津市については自然含水比のデータが得られなかったため図-4中にプロットがない。両図より、SPLは w_n と D_{50} のいずれとも相関があり、 w_n が高いほどSPLは小さく、 D_{50} が大きいほどSPLが大きいことがわかる。粗粒分含有率、自然含水比および平均粒径は互いに相関がある物理特性値であり、一般に平均粒径が大きい粗粒土の自然含水比は小さく、細粒土の自然含水比は大きい。したがって、摩擦音のSPLは土粒子径の影響を受け、粗粒分含有率が同じであっても D_{50} が大きい方が大きなSPLを示すと考えられる。

長野県諏訪市の2地点、熊本県益城町、大阪市北区の計4地点の実地盤で計測された摩擦音の音圧レベルと粗粒分含有率の深度分布を図-6(a)~(d)に示す。ここで、摩擦音はSRSで打撃貫入深さ0.2m毎に実施されるトルク計測中に計測されたものであり、 F_c はSRS実施地点近傍（約10m以内）で実施され

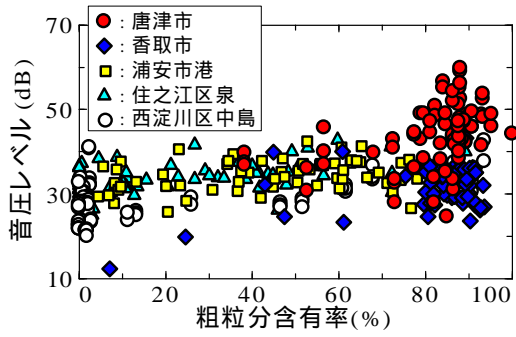


図-3 音圧レベルと粗粒分含有率の関係

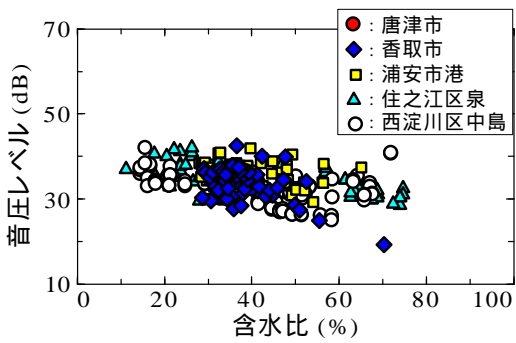


図-4 音圧レベルと自然含水比の関係

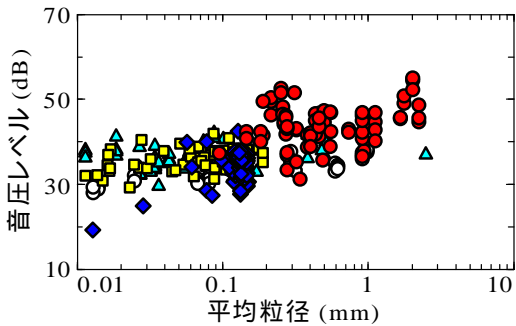


図-5 音圧レベルと平均粒径の関係

た SPT (0.5m ピッチ) のペネ試料から求めたものである。図より、SPL の深度方向の変動は粗粒分含有率の深度分布に対応していることがわかる。この結果より、摩擦音の SPL を用いて地盤の F_c を推定することが可能であると考えられる。

ここで、SPT と SRS は計測深度と実施位置が若干異なり、両者のデータを単純に比較できない。そこで、SPL の計測深度を SPT の深度に一致させる調整を行い、SPT の計測深度に対応した SPL を求めた。図-7 は深度調整後の SRS による摩擦音の SPL と SPT のペネ試料から求めた F_c の関係である。図より、全体的な傾向として F_c が大きいほど SPL が小さいことがわかる。特に $F_c < 50\%$ では、両者の関係は地点毎に線形に近い関係であることがわかる。そこで、 $F_c < 50\%$ の範囲で地点毎に SPL と F_c の関係を一次近似して $F_c = 50\%$

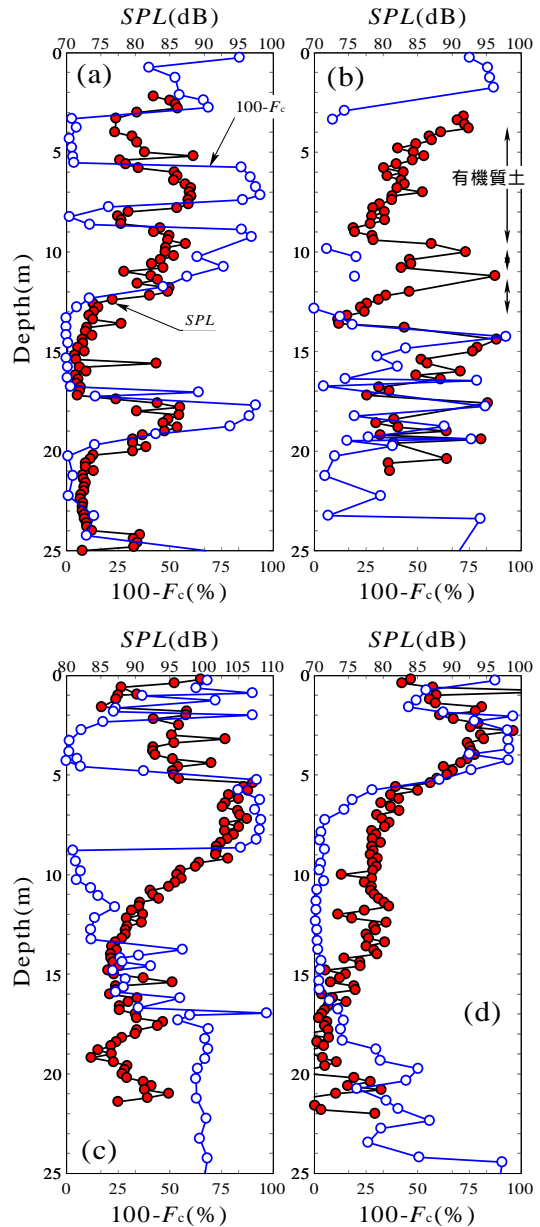


図-6 SRS による摩擦音の SPL による粗粒分含有率 ($100-F_c$) の深度分布；(a)長野県諏訪市上川、(b)長野県諏訪市四賀、(c)熊本県益城町、(d)大阪市北区

に対する SPL を SPL_{50} と定義し、 F_c と $(SPL - SPL_{50})$ の関係をプロットすると図-8 に示されるように $F_c < 50\%$ の範囲で F_c と SPL の関係は地点毎に $F_c = 50\%$ を切片とする一次式 (式-1) として表示できる。

$$F_c = 50 - A(SPL - SPL_{50}) \quad (\%, F_c < 50\%) \quad (1)$$

式-1 を用いて SRS により計測された摩擦音の SPL から算出した F_c と SPT のペネ試料から求めた F_c の比較を図-9 に示す。 $F_c > 30\%$ では摩擦音から求めた F_c は実際の F_c よりも小さい値を与えるが、 $F_c < 30\%$ では実測された F_c と比較的近い値を示している。ここでは、地点ごとに異なる定数 A と SPL_{50} を与えて F_c を算出したが、図-9 に示される結果は SRS

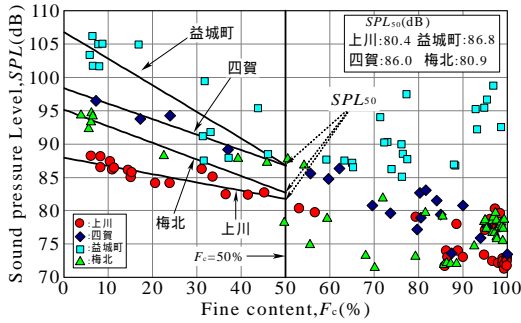


図-7 SPL と F_c の関係

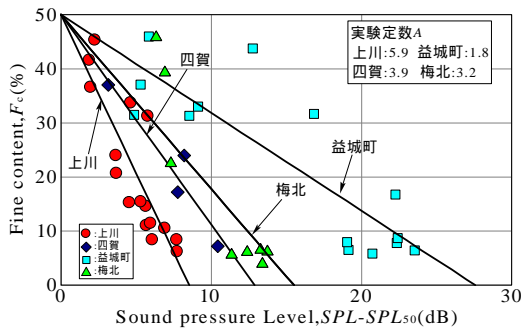


図-8 (SPL-SPL₅₀) と F_c の関係

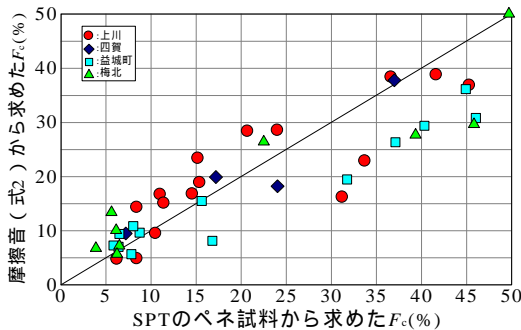


図-9 F_c の実測値と計算値の比較

による摩擦音を利用して地盤の粒度を評価できる大きな可能性を示していると考えられる。

(2) SRS による摩擦音計測状態を再現した模型実験

実地盤より得られた摩擦音と地盤の粒度特性の関係を解釈するために、また、摩擦音を利用した地盤の粒度特性値の評価技術を確認するために、SRS による摩擦音計測状態を再現した模型実験を行い、SRS コーンと地盤の摩擦音に与えるコーンの回転角速度（摩擦速度）、上載圧および細粒分含有率の影響を検討した。

実験には岐阜県土岐産の硅砂5号と同硅砂の細粒分を細粒分含有率 F_c が $F_c=0, 1, 3, 5, 10, 15, 20, 25, 30\%$ となるように混合して作製した細粒分混合硅砂を用いた。ここで、 $F_c=0\%$

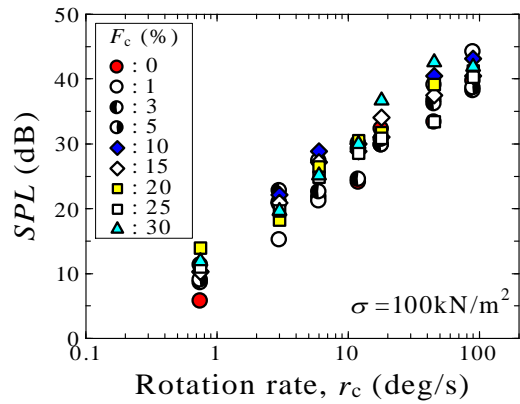


図-10 SPL とコーン回転速度の関係

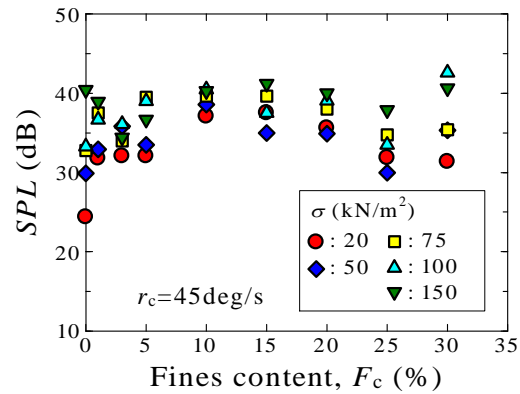


図-11 SPL と細粒分含有率の関係

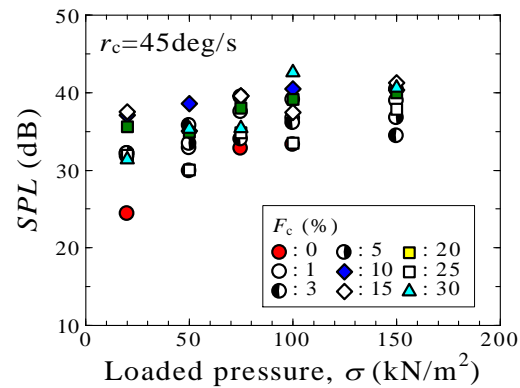


図-12 SPL と上載圧の関係

は細粒分を混合していない硅砂5号を意味する。模型地盤は作製時の相対密度が $D_r=50\%$ となるように気乾状態の土試料を突き固め法で作製した。摩擦音計測実験は、上載圧 σ とコーン回転速度 r_c の条件を変化させて行った。上載圧条件は $\sigma=20, 50, 75, 100, 150\text{kN/m}^2$ の5通りであり、模型地盤に段階的に载荷した。また、コーン回転速度 r_c の条件は $r_c=0.8, 3, 6, 12, 18, 45, 90\text{deg/s}$ である。

上載圧 $\sigma=100\text{kN/m}^2$ の実験条件で得られた回転速度 r_c と音圧レベル SPL の関係を図-10に示す。図には F_c 毎にマークを変えて結果を表示している。図より、 F_c の違いによらず r_c が高いほど SPL が大きい明らかな傾向が認め

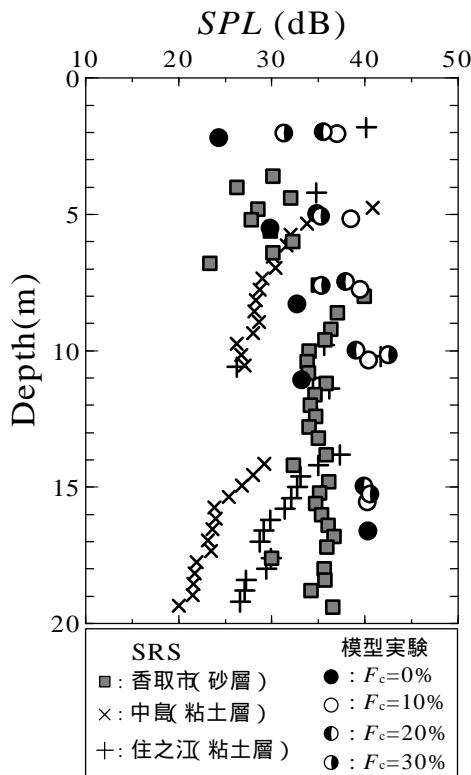


図-13 SPL と上載圧の関係

られ、両者の関係は片対数グラフ上で線形となる。しかし、同一 r_c 条件に対する SPL は F_c によって異なる値を示すことがわかる。ここで、SRS 実機のトルク計測中のコーンの回転速度は約 47deg/s であることから、これに最も近い $r_c=45\text{deg/s}$ の実験で得られた SPL を選択して F_c との関係を図-11 に示す。図より、各上載圧条件における SPL は $F_c=0 \sim 10\%$ の範囲で F_c の増加に伴って大きくなり、 $F_c=10 \sim 30\%$ の範囲で一定もしくは若干の減少傾向を示すことがわかる。また同図より、いずれの F_c においても上載圧 σ が大きいほど SPL が大きい傾向が認められる。そこで、SPL に対する σ の影響を検討するために $r_c=45\text{deg/s}$ の実験より得られた SPL と σ の関係を図-12 に示す。図より、全ての F_c において SPL は σ の増加に対して大きくなる傾向が認められ、 $\sigma=100\text{kN/m}^2$ 以下で SPL は σ に対して直線的に増加すると考えられる。しかし、図-10 に示される回転速度の変化に対する SPL の変動と比較すると、上載圧の変化に対する SPL の変動は小さい。

大阪市住之江区泉、大阪市西淀川区中島および千葉県香取市の実地盤において SRS 実機を用いて行った摩擦音計測実験より得られた SPL の深度分布を本研究で実施した模型実験の結果とあわせて図-13 に示す。模型実験については模型地盤作製時の乾燥単位体積重量と上載圧 σ から換算深度を求め、コーン回転速度 $r_c=45\text{deg/s}$ の結果をプロットした。SRS 実機による SPL は、粘土層が主体であった住之江区泉および西淀川区中島について

は粘土層の結果を、非塑性の細粒分を含む砂層が主体であった香取市について砂層の結果を示している。香取市(砂層)の SPL は深度方向に増大する傾向を示しており、模型実験の結果と整合する。一方、住之江区泉と西淀川区中島の粘土層で得られた摩擦音の SPL は深度方向に低下しており、これは模型実験の結果と反対の傾向であることから、摩擦音の SPL に対する上載圧(土被り圧)の影響は土質または粒度特性によって異なると推察される。また、SRS 実機で得られた実地盤の SPL は粘土層と砂層のいずれにおいても 20 ~ 40dB の範囲に分布していることから、摩擦音を用いて土質の違いや粒度特性値を評価するためには SPL のみでは不十分であり、スペクトルや音響パワー等の他の音響特性値を併用する必要があると考えられる。

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 2 件)

- 1) S. Yamada and A. Oshima: Study on evaluation of fine fraction content of soil using Soil-Metal friction sound for liquefaction assessment by Swedish Ram Sounding, Graduate school of engineering Osaka City University, Memoirs of the Faculty of Engineering Osaka City University, Vol. 56, pp. 29-36, 2015.
- 2) S. Yamada and A. Oshima: An attempting research on evaluating grain-size characteristics based on acoustic properties of soil for liquefaction assessment by Swedish Ram Sounding, Proc. of the 15th Asian regional conference on soil mechanics and geotechnical engineering. Fukuoka, Japan, Paper No. JPN-142, 2015. <http://doi.org/10.3208/jgssp.JPN-142>

〔学会発表〕(計 7 件)

- 1) 新大樹, 山田卓: 大型動的コーン貫入試験による摩擦音計測実験(その1: トルク計測時及びロッド引き抜き時の摩擦音の比較), 第52回地盤工学研究発表会, 2017年7月12日, 名古屋国際会議場(愛知県・名古屋市)
- 2) 水野建人, 山田卓: 大型動的コーン貫入試験による摩擦音計測実験(その2: 音を利用した粒度特性の評価) 第52回地盤工学研究発表会, 2017年7月12日, 名古屋国際会議場(愛知県・名古屋市)
- 3) 横山功基, 山田卓: SRS コーンと砂質土の摩擦音に及ぼす平均粒径と均等係数の影響 第52回地盤工学研究発表会 2017年7月12日, 名古屋国際会議場(愛知県・名古屋市)
- 4) 新大樹, 山田卓: 大型動的コーン貫入試

験による宅地の液状化判定のための貫入コーンと細粒分混合珪砂の摩擦音計測模型実験，第 51 回地盤工学研究発表会，2016 年 9 月 13 日，岡山大学（岡山県・岡山市）

- 5) 水野建人，山田卓：大型動的コーン貫入試験による貫入コーンと地盤の摩擦音と地盤物性の関係の考察，第 51 回地盤工学研究発表会，2016 年 9 月 13 日，岡山大学（岡山県・岡山市）
- 6) S. Yamada, K. Mizuno, A. Oshima and S. Hirata: Evaluation of grain-size properties using Soil-Metal frictional sound for liquefaction assessment by Swedish Ram Sounding, Proc. of the 6th International Conference on Earthquake Geotechnical Engineering, Christchurch, New Zealand, 2015.11.1, paper No. 572.
- 7) 水野建人，山田卓：動的コーン貫入試験による土質判定のための一面せん断試験装置を用いたステンレス鋼と砂の摩擦音計測実験，第 50 回地盤工学研究発表会，2015 年 9 月 1 日，北海道科学大学（北海道・札幌市）

〔産業財産権〕

○出願状況（計 1 件）

名称：特許名称

発明者：山田卓，大島昭彦，平田茂良，市村仁志，柴田芳彦

権利者：山田卓，大島昭彦，大和ハウス工業株式会社，有限会社ウィルコンサルタント

種類：特許

番号：特願 2017-068846

出願年月日：平成 29 年 3 月 30 日

国内外の別：国内

○取得状況（計 0 件）

〔その他〕

ホームページ等

6. 研究組織

(1)研究代表者

山田 卓 (YAMADA Suguru)

大阪市立大学・大学院工学研究科・准教授

研究者番号：70451789