

令和元年6月19日現在

機関番号：12101

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2016～2018

課題番号：16H04994

研究課題名(和文) 農業用ため池の地震時のすべり破壊と液状化による変形の統合的耐震診断技術の開発

研究課題名(英文) Development of integrated seismic estimation technology for failure and deformation due to liquefaction during earthquakes in agricultural small pond

研究代表者

毛利 栄征 (MOHRI, Yoshiyuki)

茨城大学・農学部・教授

研究者番号：90373224

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 11,600,000円

研究成果の概要(和文)：リングせん断試験による土質試験によってため池堤体土の超大ひずみまでの変形と強度の劣化特性を明らかにし、堤体土の「一般化標準強度低下モデル」を開発した。この累積損傷による強度低下を考慮したモデルを有限要素法解析に導入し、ため池堤体の地震時挙動と残留変形予測を行って、そのモデルの適応性を明らかにした。遠心力載荷装置を用いたため池の模型振動実験を対象として一般化標準強度低下モデルを導入した有限要素解析によるシミュレーションを実施した。その結果、堤体の地震時応答特性、進行性破壊モードや変形量などをよく予測することができており、統合的耐震診断システムの適用性を明らかにした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

現在、ため池などの土構造物の地震時の決壊の危険性を定量的に評価できる手法はない。

本研究の成果である堤体の超大ひずみレベルまでの強度低下特性モデル「一般化標準強度低下モデル」をプロトタイプとして、塑性すべり解析や有限要素法解析に導入することによって、初期の微小変形からすべり破壊、堤体の決壊にいたる大規模崩壊(決壊)を統一的に評価することが可能となる。すなわち、決壊可能性の高いため池を定量的に峻別することができ、社会的な意義は極めて高い。さらに、数百%を越える超大ひずみまでの広範囲の強度低下のモデル化は、すべての土構造物に共通の課題であり、学術的意義も高い。

研究成果の概要(英文)：We developed a ring shear test apparatus that can clarify the deformation and strength deterioration characteristics up to very large strain, and based on the test results, we developed a "generalized standard strength reduction model" that can be applied to the pond embankment soil. The model considering strength reduction due to this cumulative damage was introduced to the finite element method analysis, and the earthquake behavior of the embankment and its residual deformation prediction simulation were carried out. The simulation well predicts the results of seismic response behavior, progressive failure mode and residual deformation of the embankment obtained by the model tests of the pond embankment using a centrifugal loading device. Therefore, it has been confirmed that the generalized standard strength reduction model and finite element analysis using this model, plastic slip analysis have high applicability as an integrated seismic diagnostic system.

研究分野：農業工学

キーワード：ため池 耐震診断 土の強度と変形 土の劣化と強度低下 すべり破壊 超大ひずみ 累積損傷

様式 C-19、F-19-1、Z-19、CK-19（共通）

1. 研究開始当初の背景

全国の19.7万箇所に及ぶため池の多くは、耐震設計が導入される以前の江戸時代前に築造されており、地震や豪雨によって毎年300箇所以上の損傷が発生している。現在のため池の耐震診断はレベル1地震を原則としており、レベル2地震に対しては微小ひずみレベルでの土の特性を用いた手法によって破壊を推測するにとどまっている。このため、ため池堤体の決壊を予測することはできず、単純な安全率での判断を余儀なくされている。現状では、堤体の沈下量などの定量的指標によってレベル2地震に対する安全性を評価する具体的な手法は無く、ため池堤体がどのように変形し破壊に至るのかは未知の領域となっている。特にため池堤体に使用される多様な土の地震時の特性は全く手つかずの課題で、微小ひずみから破壊域にいたる大ひずみ領域までの特性解明とその安全性評価手法の開発が喫緊の課題となっている。

申請者は、堤体の耐震診断技術に関して、微小ひずみレベルでの土の三軸圧縮試験の結果を基に図1のように強度低下現象をモデル化して安全性照査手法を開発した。このような地震時に生じる堤体土の損傷（ダメージ）を強度低下として表現するモデルは、独創的で極めて有用な手法であることを明らかにしたが、三軸圧縮試験自体の適用範囲が数%のひずみレベルまでであるため、その試験結果は破壊以前の挙動解明に限定される。すなわち、このモデルでは数mmの微小な変形の段階での土の特性を用いて数mのすべり破壊を外挿的に予測していることから、大きなすべりが発生して破壊する堤体を峻別できないことは自明である。

ため池の決壊を定量的に予測する視点として2011年東北地方太平洋沖地震で被害のあった藤沼ため池の決壊原因を参考に、①大きな地震動が長時間継続したこと、②堤体材料の締固めが緩かったこと、③堤体の土が地震動によって強度低下したことの3点が重要である。これらの原因に対する学術的な現状は、④750galを越える大きな地震動には現行のすべり解析（安定解析）は適用できない、⑤地震中の強度低下を考慮し、堤体のすべり量を定量的に予測できる解析手法はない、というものである。申請者らは①～③に示す原因に的確に答えるためには、ため池堤体が、豪雨による飽和領域の拡大と地震による堤体強度の低下から液状化に進展して堤体が決壊するという連鎖的な現象の解明が不可欠であることを提示している。

具体的には、土の力学的な特性変化を超大ひずみレベルまで明らかにすることが、最も重要であると考へた。また、その結果に基づくレベル2地震に対する安全性照査技術の開発と評価が重要と考へている。しかしながら、不連続なすべり現象から液状化による強度の消失までを明らかにした土質試験は国内外でも実施されていない。

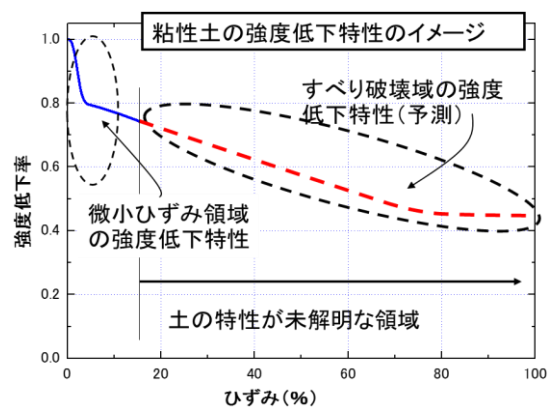


図1 微小ひずみレベルでの土の強度低下特性（青線）と大ひずみ特性の予測

2. 研究の目的

全国の約14万箇所の老朽化が進んだため池では、毎年の集中豪雨や大規模地震によって甚大な被害を生じている。農水省はため池のレベル1地震と豪雨に対する一斉点検を実施して、8,978箇所危険性が高いことを報告しているが、その対策としてのレベル2地震に対する安全性診断ができていない。申請者は微小なひずみレベルでのため池堤体の安全性照査技術を開発したが、すべり破壊や液状化が発生する超大ひずみレベルでの土の強度・変形特性が解明されていないことが、真のレベル2耐震診断技術開発上の大きな課題となっている。本研究では、強い地震動による堤体土の強度低下と剛性低下現象を解明し、その標準強度低下モデルを構築することを目的とする。このモデルを用いてすべり破壊を予測する総合的な耐震診断技術を開発する。

3. 研究の方法

茨城大学を中核として2つの組織で研究体制を構築し、4段階の行程で研究を推進する。

第1段階：堤体土の微小ひずみから中ひずみまでの土の強度と剛性の低下特性を解明する。

第2段階：超大ひずみせん断が可能な特殊な試験装置によって「すべり発生後の超大ひずみ時の堤体土の強度特性」を明らかにし、その標準強度低下モデルを開発する。

第3段階：このモデルを有限要素法解析に導入し、すべり破壊と液状化解析を実施する。

第4段階：模型実験との比較検証によって解析システムの信頼性を確認して、統合的な耐震診断システムを構築する。

(1) 平成28年度

全国のため池の代表的な堤体土を採取・分類し、類型化した土毎に、強度と変形性能の低下特性を明らかにする。

- ① ため池堤体土の類型化（類型化とデータベースの構築）
- ② 大ひずみ領域での強度低下特性の解明（繰返し損傷試験機の開発と検証）

(2) 平成 29 年度

平成 28 年度に実施した試験をすべり発生後の超大ひずみレベルまで拡張して試験を実施する。

- ① 締固めの効果と強度低下の関係解明（リングせん断試験の実施）
堤体土の締固め密度を 3~4 段階に設定した試料で繰返し損傷試験を実施する。
- ② 強度低下モデルに締固め効果を導入する。
全国のため池堤体に適用可能な汎用的な「標準強度低下モデル」を構築する。

(3) 平成 30 年度

平成 29 年度に開発した「標準強度低下モデル」を塑性すべり解析と有限要素法解析に組み込み、すべり崩壊から液状化による沈下・崩壊までを包括的に予測できる耐震解析モデルを検証する。

- ① 強度低下を導入した耐震診断手法の検証（塑性すべり解析、有限要素法解析）
- ② すべりの発生から沈下・崩壊までを包括的に予測できる耐震解析モデルの開発と検証。
- ③ 平成 29 年度に開発した「一般化標準強度低下モデル」を塑性すべり解析手法に導入し、ひずみ量が 100% を越えるすべり破壊までの解析を検証・評価する。
- ④ 開発した有限要素法にモデルを適用し、液状化による堤体の沈下量予測を可能にする。
- ⑤ 模型実験との比較による解析の予測能力の検証
- ⑥ ため池堤体の遠心力载荷模型実験を実施し、解析結果と比較検証して、剛性低下と強度低下モデルの妥当性を明らかにする。

4. 研究成果

以下に主な研究成果を項目ごとに示す。

(1) 繰返し損傷試験機の開発と検証

大変形時（数百%）までの強度変化やせん断剛性を明らかにすることができる試験装置を開発し、その精度を確認するとともに繰返し試験や単調試験を自由に組み合わせることができる制御プログラムを開発した。基本構造はリングせん断試験であるが、飽和状態の土試料も実験できるように、せん断リングと载荷リングの隙間は 0.2mm としており、液状化に至る挙動把握のために試料に発生する間隙水圧も測定可能な構造とした。試験機のせん断リングと上下ロードセル部分を図 2 に示す。上下リングは内径 9cm、外径 15cm のドーナツ形で深さは 6cm の寸法を持っており、毎分 0.0002~0.8mm の速度でせん断可能である。供試体は上下リングで拘束されたせん断リング内に高さ 4cm で作成し、せん断面は中央部、すなわち底面から 2cm の面に発生する。



図 2 せん断リング部

(2) せん断変形と強度試験結果（大変形時の最大強度から残留強度への軟化特性）

リングせん断型の繰返し損傷試験機によって、ため池堤体土の大変形試験を実施した。その結果、図 3 に示すように、せん断強度のピークは 5~10mm 以内の回転（せん断量）で発生し、その後のせん断によって強度は急激に低下することが明らかとなった。不飽和の状態の試料でもこの軟化特性（強度低下）は急激で、一般的な試験に利用されている三軸圧縮試験では見出すことのできなかつた特性である。繰返し試験（せん断変位±4mm で反転し、回数 5 回の事例）も同図に示すが、その後の連続して実施した単調せん断試験で得られた強度は、繰返しせん断（ダメージ）のない場合の 55% 程度まで減少しており、明確な強度低下現象を確認した。繰返し部分を詳細に見ると、繰返しを重ねるごとに発揮される強度が低下しており、強度低下の累積が進行していることがわかる。また、単調せん断試験はピーク強度から急激に強度が低下しているのに対し、繰返しせん断を実施した場合にはなだらかに強度低下しており、せん断面の劣化の影響を確認できる。

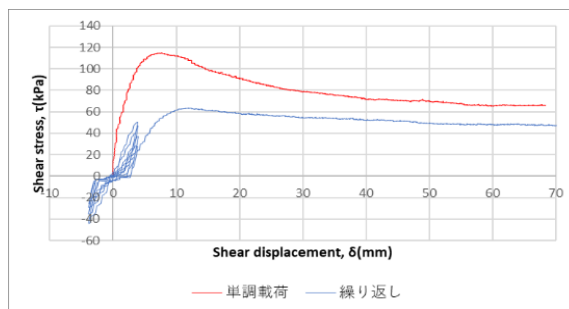


図 3 せん断変位-せん断応力の関係

図 4 には含水比と密度が異なる条件で実施したリングせん断試験の応力経路を示す。緩詰では体積収縮、密詰では体積膨張の挙動を示している。また、同一締固め曲線上の試料の強度を比較すると、最適含水比よりも乾燥側でピーク強度が最大となっている。締固め度と含水比（飽和度）によって、発揮される強度（ピーク強度）を規定できる可能性が明らかとなった。

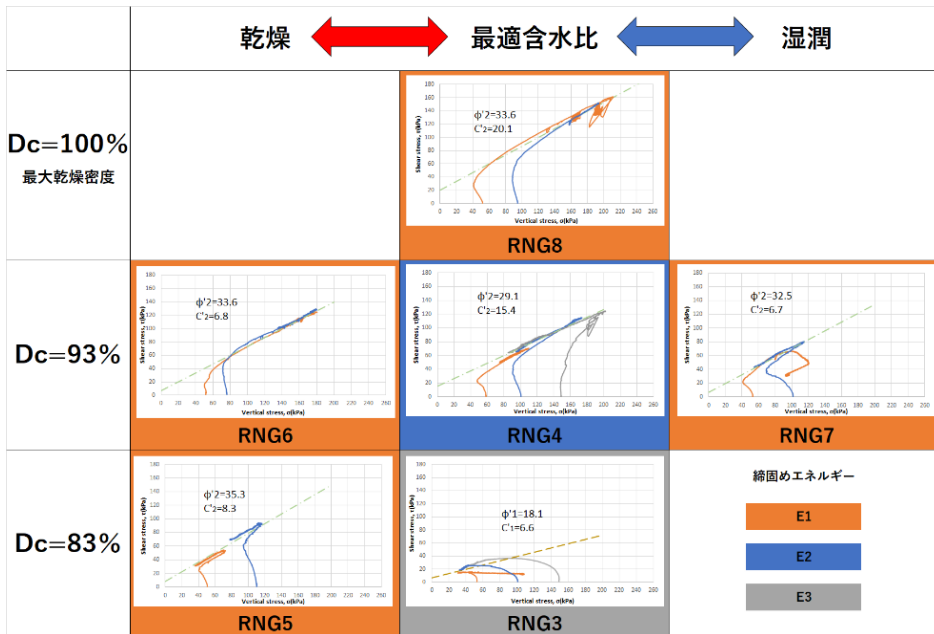


図4 締固めエネルギーと締固め曲線の関係

(3) ため池堤体土の強度低下モデル

堤体土の強度が地震動によって低下する特性を繰返し載荷と単調載荷を組み合わせた定体積せん断試験結果から求める。図5に示す実験結果から上部盛土は繰返し載荷強度が低く、さらに初期せん断強度が低い上に低下しやすい材料であることが分かる。一方、Dc=95%で締め固めれば非排水繰返し載荷強度や初期せん断強度は倍増し、低下率も小さくなる事が分かる。このことからダメージと強度低下量の関係を表す「強度低下モデル」を非排水繰返し載荷によって累積するひずみ量 (DA) と強度低下量の関係として定義し、土質分類ごとに整理して、①②の様にモデル化する。対象とする堤体土を砂と粘性土に大分類し、それぞれのグループを代表する標準強度低下曲線を設定した。

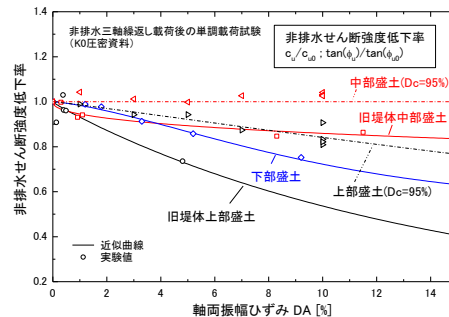


図5 堤体土の強度低下曲線

(4) 土の剛性・強度の劣化を考慮した塑性すべり解析の検証

不規則な地震波を受けることによって供試体に生じる損傷ひずみ ϵ_p は、繰返し応力振幅比SR、繰返し載荷回数N、を用いて強度低下モデルから刻々と変化する強度の時刻歴として求めることができる。この強度低下の考え方を円弧の臨界面を想定した塑性すべり解析に適用して、各スライスで生じる損傷度 (ひずみDA) の時刻歴を求め、さらに、各スライス底面で発揮できる強度の時刻歴を求める。すなわち、経時的に低下するせん断強度を用いて、Newmark法の原理に従って地震波全体によって生じるすべり変位量を累積的に求めるのである。図6に解析で得られた最大変位量および上部盛土内での最大変位量の円弧すべり面を示す。堤体の密度などの条件は、実際に地震で崩壊したため池と同じ値を設定しており、降伏震度の初期値が低い上に地震荷重によって大きく低下するため、実際の崩壊と同様に非常に大きなすべりが発生する結果となった。解析によるすべり面の位置も実際の位置と整合する。

① 砂質土の標準強度低下モデル
 強度は ϕ_{cu} で表している。

$$\phi_{cu} / \phi_{cu0} = 1 + \alpha \cdot DA \quad (1a)$$

$$\alpha = \min(\alpha 1, \alpha 2)$$

$$\alpha 1 = -0.111 + 0.048 \rho_t \quad (\rho_t: \text{湿潤密度})$$

$$\alpha 2 = -0.048 + 0.002w \quad (w: \text{含水比})$$

② 粘性土の標準強度低下モデル
 粘性土グループの強度低下曲線を示す。

$$\phi_{cu} / \phi_{cu0} = 1 + \alpha \cdot DA \quad (2a)$$

$$\alpha = \min(\alpha 1, \alpha 2, \alpha 3)$$

$$\alpha 1 = -0.322 + 0.012w \quad (w: \text{含水比})$$

$$\alpha 2 = -0.228 + 0.004Fc \quad (Fc: \text{細粒分含有率})$$

$$\alpha 3 = -0.126 + 0.0049 \phi_{cu0} \quad (\phi_{cu0}: \text{初期摩擦角})$$

以上のように、堤体土の強度低下モデルを導入した塑性すべり解析によって、地震動のすべての波による強度低下を考慮したすべり変形量を累積することによって、実際ため池堤体の破壊現象と一致した結果が得られることが明らかとなった。

(5) 土の剛性・強度の劣化を考慮した有限要素解析と遠心実験との比較

堤高 9m 程度の中規模のため池を想定して、遠心場での震動模型実験を実施した(図7)。今回の実験では遠心力を 30G とした。

飽和無補強の堤体モデルでは、図8に示すように加振によって2段階の大規模なすべりが発生し、いずれも法先の堤体の底部に至るすべり面が入った。それに伴って天端に大きなクラックが発生し、堤体全体が水平方向に広がるように変形していることが確認できる。

数値解析は2次元の有限要素法解析を実施した。本解析では、動的応答解析コードである Nonsolan を使用し、土の限界状態とひずみ軟化挙動、すなわち、強度低下を導入した弾塑性モデルを採用した(田中、1992)。図9に示すせん断ひずみ分布は、下流法先から天端への大きなすべり破壊が発生することを示唆しており、遠心実験結果と整合する。すなわち、解析結果は堤体の破壊状況にある程度予測できたと判断できる。

図10は、堤体の応答加速度、天端の沈下量の実験と解析結果を示す。両結果共に天端の加速度応答で見ると入力加速度 200gal 以前の再現性がよく、250gal~400gal のステージでは、応答の増幅は見られず、堤体の破壊による減衰を反映した挙動が表れていると考えられる。天端下流側の沈下量は再現性がよく、概ね沈下量と沈下の開始時刻を再現できたと判断できる。

以上のように、堤体土の強度低下モデルを導入した有限要素法によって、地震時の動的応答とともに、最も重要な天端の沈下量をよく予測できることが明らかとなった。

(6) ため池堤体の安全性に関する統合的耐震診断システム

堤体土の標準強度低下モデルとそれを導入した塑性すべり解析、弾塑性有限要素解析を適切に連携運用することによって、ため池の堤体規模に応じた安全性を天端沈下量として定量的に評価する手法、すなわち、統合的耐震診断システムの信頼性を示した。

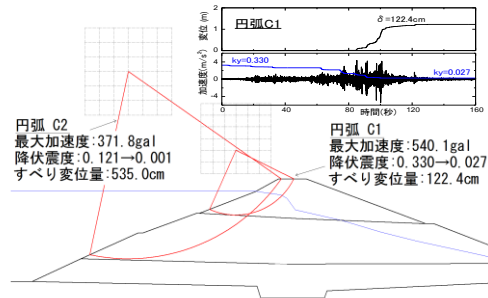


図6 Newmark-D法解析 (Dc=87%)

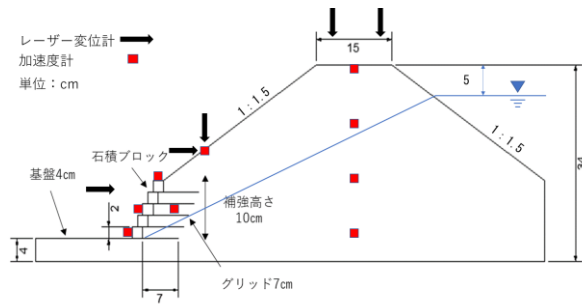


図7 遠心石積ブロックを用いた補強堤体模型の実験概要

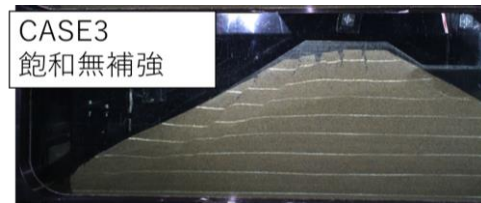


図8 加振後の堤体状況写真とスケッチ

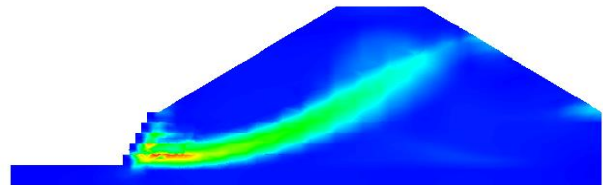
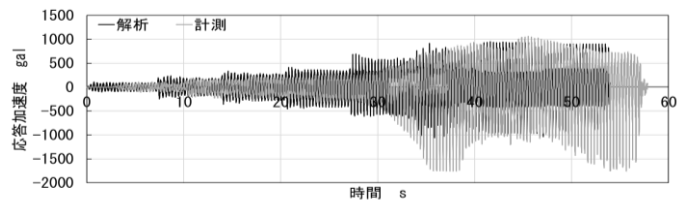
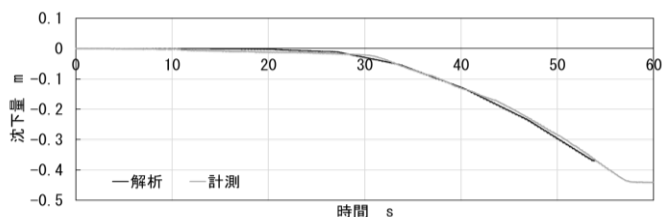


図9 せん断ひずみ分布



(a) 天端の加速度応答



(b) 天端下流側沈下量

図10 堤体加速度応答と上流側天端沈下量

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計4件)

- ① 田中忠次、龍岡文夫、毛利栄征、松浦正一、三浦亨、2011年東北地方太平洋沖地震による小規模ダムの破壊メカニズムと強化復旧に関する考察、大ダム、No. 246、pp. 79-86、2019/01【査読有】
- ② 王 博涵、田頭秀和、泉 明良、毛利栄征、田中忠次、ため池の石積みブロック補強に関する遠心震動実験と解析的検討、国際ジオシンセティックス学会、pp. 167-174、2018/12【査読有】
- ③ A. Duttine, F. Tatsuoka, T. Shinbo, Y. Mohri, A new simplified seismic stability analysis taking into account degradation of soil undrained stress-strain properties and effects of compaction Validation of Dynamic Analysis of Dams and Their Equipment, ICOLD 国際大ダム会議, Vol. 1, pp. 215-234, 2018/09【査読有】
- ④ F. Tatsuoka, T. Tanaka, K. Ueno, A. Duttine, Y. Mohri, Soil properties and seismic stability of old and new Fujinuma dams Validation of Dynamic Analysis of Dams and Their Equipment, ICOLD 国際大ダム会議, Vol. 1, pp. 119-170, 2018/09【査読有】

〔学会発表〕(計2件)

- ① 君嶋美優、毛利栄征、リングせん断試による験土の強度特性に関する研究、農業農村工学会大会講演会、2019/09
- ② 林 真美、王 博涵、毛利栄征、三谷浩司、ため池堤体強度データベースの構築と新たな強度予測式の提案、農業農村工学会大会講演会、pp. 604-605、2017/08

6. 研究組織

(1) 研究分担者

研究分担者氏名：河端 俊典

ローマ字氏名：KAWABATA TOSHINORI

所属研究機関名：神戸大学大学院農学研究科

部局名：食料共生システム学専攻

職名：教授

研究者番号(8桁)：20335425

(2) 研究協力者

研究協力者氏名：田頭 秀和

ローマ字氏名：TAGASHIRA HIDEKAZU

研究協力者氏名：泉 明良

ローマ字氏名：IZUMI AKIRA

※科費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。