

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 25 年 4 月 15 日現在

機関番号：34428

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2010～2012

課題番号：22560501

研究課題名（和文） 凍結試験により細粒土の環境地盤工学的諸特性を評価する方法

研究課題名（英文） Analysis of the geo-environmental properties of fine-grained soils based on freezing tests

研究代表者

伊藤 譲 (ITO YUZURU)

摂南大学・理工学部・教授

研究者番号：30281752

研究成果の概要（和文）：

細粒土の工学的性質を知ることは、軟弱地盤上の建造物の設計や建設汚泥の有効利用方法の開発にとって重要である。本研究では、土を凍結させて、従来から知られている試験方法との比較を行った。その結果、次のような新しい知見が得られた。(1)細粒土の性質は、土粒子自体ではなく、土粒子による影響を受けた土粒子近傍の水分の存在に支配されている。(2)土粒子近傍の水分は土粒子と一体で挙動し、土の性質は土粒子から遠く土粒子の影響を受けていない水分により支配されている。

研究成果の概要（英文）：

The engineering properties of saturated fine-grained soils are important to the design on soft grounds and to the effective utilization of sludge for construction. A hypothesis was proposed that the engineering properties of fine-grained soil might be interpreted from its behavior in a freezing process. Based on the test results, the following conclusions were obtained. (1) The permeability of fine-grained soils appears to be governed by the pore water expressed as a frozen void ratio rather than the total pore water. (2) The adsorbed water expressed as an unfrozen void ratio might be work as a part of the soils but has no influence over them.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	1,600,000	480,000	2,080,000
2011年度	1,100,000	330,000	1,430,000
2012年度	700,000	210,000	910,000
総計	3,400,000	1,020,000	4,420,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：土木工学・地盤工学

キーワード：凍結試験，細粒土，透水係数，一軸圧縮強さ，凍結間隙比，未凍結間隙比，自由水，吸着水

1. 研究開始当初の背景

建設や汚染土壌の浄化工事において地盤の工学的性質を把握することは極めて重要である。工学的性質を把握するための土質試

験から各種の工学的諸量が得られるが、それらは地盤工学的メカニズムを明らかにするものではない。例えば、その目的に応じて間隙比等の物理定数、透水係数、一軸圧縮強さ

等を個別の試験方法から求めること自体は可能であるが、本来は一組の試験からすべてが知られても不思議ではない。現代でも、このような「群盲象をなでる」といった状態が続いている。

ところで、土は土粒子などの固体、水(液体)、空気などの気体の3相から構成され、土粒子と水とは固液界面で接している。土中の物理化学現象はこのような界面で生じ、特に細粒土においては土粒子と水との相互作用が働いており、その境界は明確ではなく連続的に変化している。土粒子表面の間隙水は土粒子からの強い吸着作用を受け吸着水と呼ばれ、通常の間隙水とは密度や粘性などが異なった性質を有し、その外側に自由水が存在する。

つまり、土粒子による影響を受けて物性の変化した間隙水の量を把握することができれば、細粒土における工学的性質を推定することができると考えられる。

本研究では、細粒土の凍結現象に着目して間隙水の性質を理解できないか検討を行なった。そのために次の現象を利用した。

「細粒土を凍結させると間隙水が温度低下に伴い徐々に凍結するが、氷点下の温度においても液体状態を維持している未凍結水が存在する。」

このような未凍結水は粗粒土の凍結時にはみられない細粒土に特有の現象であり、その存在理由は主として土粒子からの吸着作用であるとされる。土の環境地盤工学的性質は、氷点下で凍結する水分と未凍結状態で存在する水分の割合と何らかの関係を有するものと考えられた。

本研究は、この着想を基に凍結試験から細粒土の水理的・力学的挙動を間隙水の吸着の強さの指標として簡単に求める方法を提案するものである。

2. 研究の目的

本研究では、細粒土の工学的性質を土粒子の表面力により影響を受けた間隙水が支配していると仮定し、その評価方法として凍結試験から得られた指標の妥当性を検討した。

(1)数種類の凍結試験方法を比較検討し、凍結試験から得られた指標として凍結間隙比 $e_{f(TC)}$ 、 $e_{f2(TC)}$ 未凍結間隙比 $e_{uf(TC)}$ および凝固点温度 ΔT 、 ΔT^* を提案した。

(2)凍結試験から得られた指標に対する一軸圧縮強さ q_u 、変形係数 E_{50} など土の力学特性との関係性について検討する。

(3)凍結試験から得られた指標に対する透水係数 k など土の透水性との関係を検討する。

(4)凍結試験から得られた指標に対する体積圧縮係数 m_v 、圧密係数 c_v 、圧縮指数 C_c などの圧密特性との関係を検討する。

3. 研究の方法

(1) 一軸圧縮試験

研究では33種類の細粒土を使用した。一軸圧縮試験はJIS A 1216に従って実施した。試料土に液性限界の約1.5倍の蒸留水を加え練り混ぜ、ペースト状にして12時間以上放置養生する。その後脱気し、 $\phi = 10 \text{ cm}$ のセルにて $39.2 \sim 1254.4 \text{ kN/m}^2$ の段階で荷重を載荷し、 $\phi = 3.5 \text{ cm}$ 、 $h = 6 \sim 7 \text{ cm}$ の円筒形供試体を作製した。

(2) 圧密透水試験

圧密試験はJIS A 1217に従い実施した。

(1)と同様に前処理した試料土を、圧密リングに流し込み、加圧板を載せ12時間以上静置した。圧密圧力 $p = 9.8 \text{ kN/m}^2$ から荷重増分比 $\Delta p/p = 1$ として、 $p = 1254.4 \text{ kN/m}^2$ まで7段階の荷重において24時間の圧密試験を行い、圧密係数 c_v 、圧縮指数 C_c を求めた。

また、圧密試験の各々の24時間荷重直後に変水位透水試験を行なった。

(3) 凍結体積膨張試験

圧密試験において $p = 19.6 \sim 1254.4$ kN/m² まで供試体を圧密し、供試体を真空パックして、不凍液で満たされたセルに挿入し、凍結用バスで 0°C ~ -20°C まで降下させ、測定容器に接続したビュレットにて供試体の体積変化を測定し、Pt センサーにて供試体温度を測定した。体積変化から供試体中の凍結した間隙水の体積を計算する。

(4) 体積膨張試験から得られる指標の定義

式(1)~(3)に凍結水体積 $V_{wf}(T_C)$ 、凍結間隙比 $e_{f1}(T_C)$ 、凍結間隙比 $e_{f2}(T_C)$ を示す。 T_C までに凍結する水分で定義される $e_{f1}(T_C)$ は、土粒子に対する凍結水の体積の比であり、 $e_{f2}(T_C)$ は土粒子と未凍結水に対する凍結水の比である。このような水分は、自由水に近い間隙水であると考えられる。未凍結間隙比 $e_{u1}(T_C)$ は、式(4)に示すとおり通常の間隙比と凍結間隙比の差として定義されるものであり、土粒子近傍の吸着水と呼ばれる間隙水に近い。

$$V_{wf}(T_C) = (\Delta V_{fT_C} - \beta \cdot \Delta T \cdot V) / \gamma_{(T_C)} \quad (1)$$

$$e_{f1}(T_C) = \frac{V_{wf}(T_C)}{V_s} \quad (2)$$

$$e_{f2}(T_C) = \frac{V_{wf}(T_C)}{V_s + V_{wu}(T_C)} \quad (3)$$

$$e_{u1}(T_C) = e - e_{f1}(T_C) = \frac{V_{wu}(T_C)}{V_s} \quad (4)$$

ここで、 ΔV_{fT_C} : T_C におけるスタンドパイプの水位差(cm³)、 β : 不凍液の体積膨張係数(1/°C)、 ΔT : 凍結水量測定時の不凍液温度(°C)、 V : 供試体を入れた時の凍結水量測定容

器内の不凍液の体積(cm³)、 $\gamma_{(T_C)}$: T_C において水の凍結による体積変化率、 $V_{wf}(T_C)$: 凍結水量(cm³)、 $V_{wu}(T_C)$: 未凍結水量(cm³)、 V_s : 土粒子体積(cm³)である。

本報告では-1°Cまでに凍結する水分 $e_{f1}(-1_C)$ と $e_{f2}(-1_C)$ 、未凍結状態の水分 $e_{u1}(-1_C)$ を用いている³⁾。また、 $C_{ef1}(-1_C)$ は、 $e_{f1}(-1_C) \cdot \log p$ 曲線の傾きとして定義した。

(5) 凝固点降下測定試験

圧密供試体に Pt センサーを挿入して袋に密閉して、0°C の不凍液で冷却する。その後、-5°C まで急速冷却する過程において凍結が始まり、供試体温度一定状態が生じる。この温度が凝固点温度であり、0°C との差を凝固点温度 ΔT とする。

4. 研究成果

(1) 凍結間隙比 $e_{f1}(-1_C)$ 、未凍結間隙比 $e_{u1}(-1_C)$ と一軸圧縮強さ q_u

図-1 に凍結間隙比 $e_{f1}(-1_C)$ と一軸圧縮強さ q_u の関係を示す。図より、 p が増加すると $e_{f1}(-1_C)$ が小さくなり q_u は大きくなる傾向が見られる。これは、自由水に近い水分の割合を示す $e_{f1}(-1_C)$ が小さくなると強度増加に繋がることを意味する。

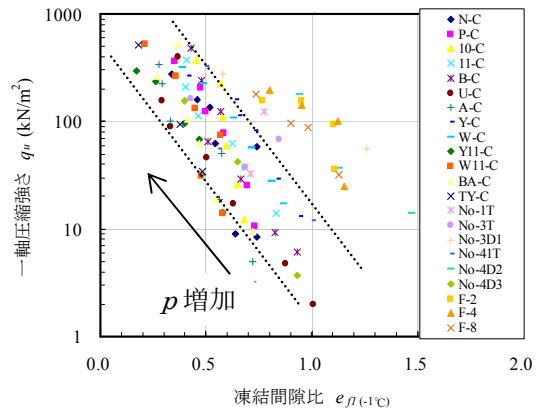


図-1 凍結間隙比 $e_{f1}(-1_C)$ と一軸圧縮強さ q_u

図-2 に未凍結間隙比 $e_{u1(-1^{\circ}\text{C})}$ と一軸圧縮強さ q_u の関係を示す。図より、 p が増加すると $e_{u1(-1^{\circ}\text{C})}$ は変動せず、 q_u は大きく低下している。以上より、 q_u を支配しているのは、 $e_{u1(-1^{\circ}\text{C})}$ で示される -1°C までに凍結する水分であり、 $e_{u1(-1^{\circ}\text{C})}$ で示される -1°C 以下で存在する水分は q_u に影響を与えていないことを意味する。

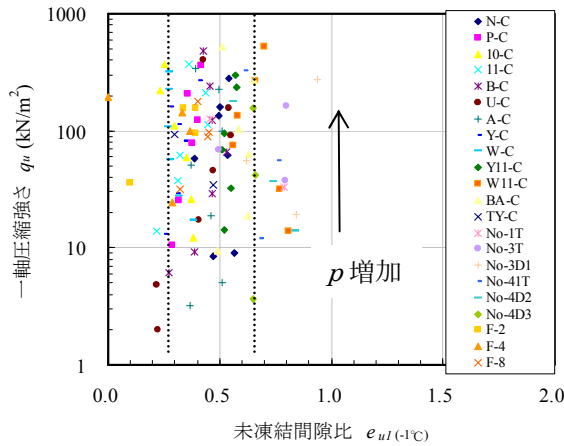


図-2 未凍結間隙比 $e_{u1(-1^{\circ}\text{C})}$ と一軸圧縮強さ q_u

(2) 凍結間隙比 $e_{f1(-1^{\circ}\text{C})}$ と体積圧縮係数 m_v の関係

図-3 に凍結間隙比 $e_{f1(-1^{\circ}\text{C})}$ と体積圧縮係数 m_v の関係を示す。図より、 p が増加すると $e_{f1(-1^{\circ}\text{C})}$ が小さい供試体では m_v も小さくなる傾向が見られる。これは、圧密により排水されるのは -1°C までに凍結する自由水に近い間隙水で

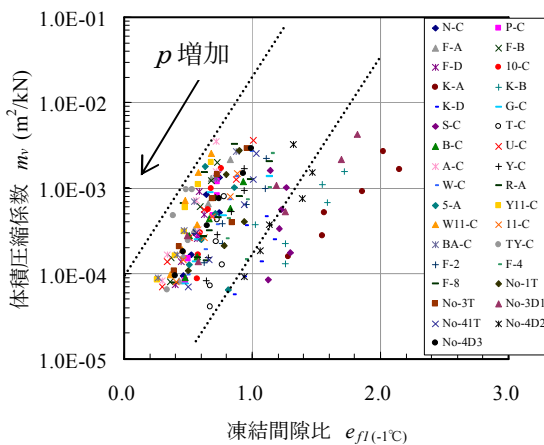


図-3 凍結間隙比 $e_{f1(-1^{\circ}\text{C})}$ と体積圧縮係数 m_v

あることを示す。

(3) 圧縮指数 C_c と凍結試験から得られた $C_{cf1(-1^{\circ}\text{C})}$ の関係

図-4 に圧縮指数 C_c と $e_{u1(-1^{\circ}\text{C})}$ - $\log p$ 曲線の傾きである $C_{cf1(-1^{\circ}\text{C})}$ の関係を示す。図より、 $C_{cf1(-1^{\circ}\text{C})}$ とは全体的に 1 対 1 の関係になっていることがわかる。このことは、前述の m_v と同様に、圧密で排水されるのは自由水に近い水分であることを裏付けるものである。

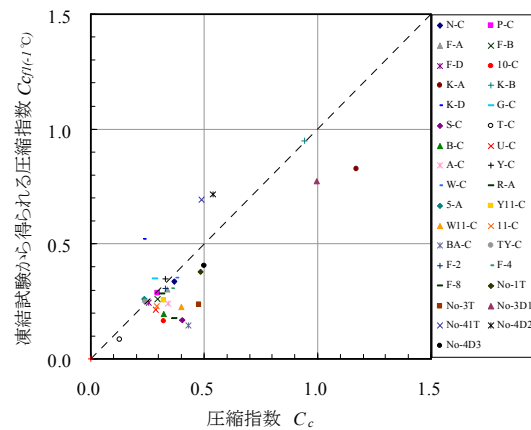


図-4 圧縮指数 C_c と凍結試験で得られた $C_{cf1(-1^{\circ}\text{C})}$

(4) 凍結間隙比 $e_{f2(-1^{\circ}\text{C})}$ 、未凍結間隙比 $e_{u1(-1^{\circ}\text{C})}$ と透水係数 k の関係

図-5 に凍結間隙比 $e_{f2(-1^{\circ}\text{C})}$ と透水係数 k の関係を示す。ここで $e_{f2(-1^{\circ}\text{C})}$ は、凍結する水分

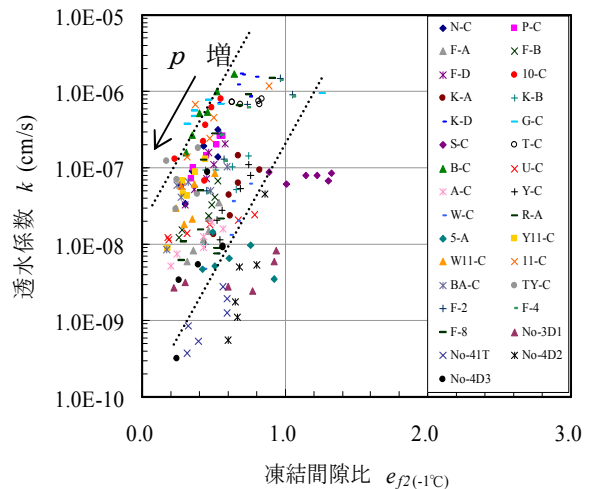


図-5 凍結間隙比 $e_{f2(-1^{\circ}\text{C})}$ と透水係数 k

に対する土粒子と未凍結水の体積の比であり、土中の透水間隙を示す。図より、 p の増加で $e_{fz(-1^{\circ}\text{C})}$ が小さくなり、 k も小さくなる傾向がある。このことは、 p が増加すると自由水が排水され k は減少することを示す。

図-6に未凍結間隙比 $e_{ul(-1^{\circ}\text{C})}$ と透水係数 k の関係を示す。図より、全体的に p が増加しても $e_{ul(-1^{\circ}\text{C})}$ はほとんど変化せず、 k が減少している。しかし、 $e_{ul(-1^{\circ}\text{C})} = 0.6$ を越えると k の低下傾向が落ち着く。

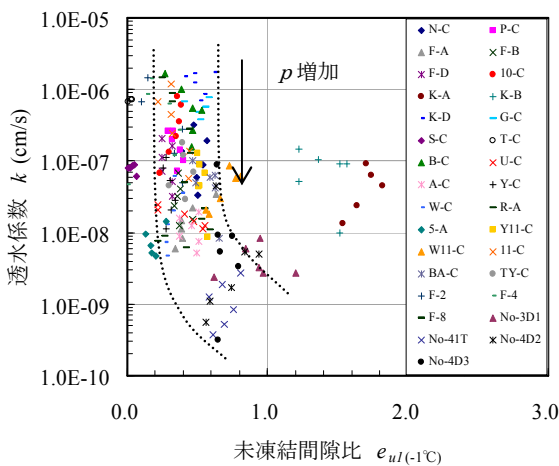


図-6 未凍結間隙比 $e_{ul(-1^{\circ}\text{C})}$ と透水係数 k

(5) 凍結間隙比 $e_{fz(-1^{\circ}\text{C})}$ 、未凍結間隙比 $e_{ul(-1^{\circ}\text{C})}$ 、凝固点温度 ΔT と圧密係数 c_v の関係

図-7に凍結間隙比 $e_{fz(-1^{\circ}\text{C})}$ と圧密係数 c_v の関係を示す。図より、各々の試料については、 p の増加によって $e_{fz(-1^{\circ}\text{C})}$ が小さくなるほど c_v が大きくなる傾向がある。また、 p が同じであれば、 $e_{fz(-1^{\circ}\text{C})}$ が大きい試料ほど c_v は大きくなる。全体的な傾向では比較的粘土分の多い試料は c_v が小さくなり、シルト分の多い試料は c_v が大きくなっている2つのグループに分かれている。しかし、円で囲った現場の試料は粘土分とシルト分の割合がどちらにも片寄っていないが、 c_v は他の試料に比べて小さくなっている。

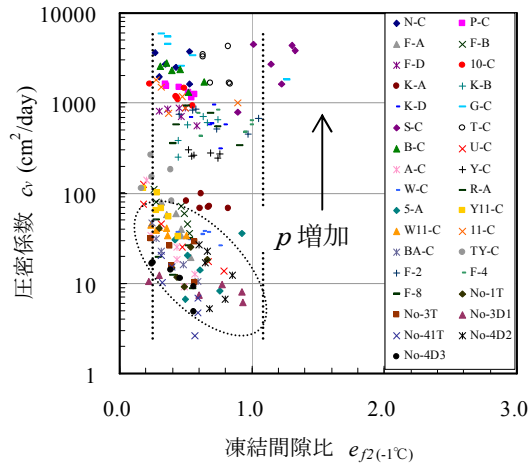


図-7 凍結間隙比 $e_{fz(-1^{\circ}\text{C})}$ と圧密係数 c_v

図-8に未凍結間隙比 $e_{ul(-1^{\circ}\text{C})}$ と圧密係数 c_v の関係を示す。図より、 p が増加しても $e_{ul(-1^{\circ}\text{C})}$ は変化しないが、 c_v は急増している。そして、 k との関係と同様に $e_{ul(-1^{\circ}\text{C})} = 0.6$ を下回ると c_v の低下傾向が落ち着く。

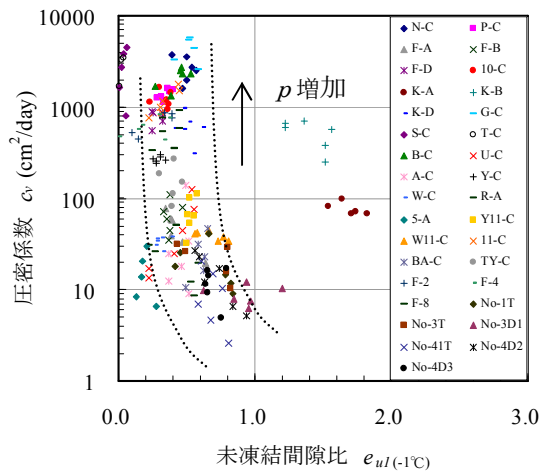


図-8 未凍結間隙比 $e_{ul(-1^{\circ}\text{C})}$ と圧密係数 c_v

図-9に凝固点温度 ΔT と圧密係数 c_v の関係を示す。図より、 p が増加すると凝固点温度 ΔT が低くなり c_v は増加する傾向がある。圧密によって自由水が排水され、吸着水が残るため c_v は小さくなると予想されたが、結果は逆である。この理由は、圧密で排水されるべき自由水の量が減少し、吸着水の増加と相殺

されたものと考えられる。

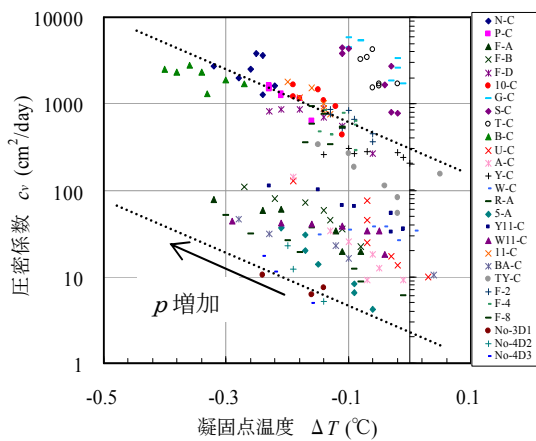


図-9 凝固点温度 ΔT と圧密係数 c_v

(6) まとめ

本研究の成果を以下のようにまとめる。

- ① 飽和細粒土の強度発現は、従来、土粒子近傍の吸着水によって粘着力で代表される細粒土特有の性質を発揮するものと考えられていた。しかし、本研究で得られた結果によると土の強度特性(q_u , E_{50})は間隙水中の吸着水(未凍結間隙比 $e_{ul(1^\circ\text{C})}$ で代表される)ではなく、自由水(凍結間隙比 $e_{fl(1^\circ\text{C})}$ で代表される)によって支配されていることが明らかとなった。
- (2) 圧密沈下に関して、体積圧縮係数 m_v や圧縮指数 C_c の実験からは、圧密荷重により排水される間隙水は均一に排水されるのではなく、土粒子の遠方の自由水から順番に排水されることが明らかとなった。
- (3) 圧密時間に関して、圧密係数 c_v は吸着水が一定量までは、吸着水量と関係がなく大きく変化するが、 $e_{ul(1^\circ\text{C})} = 0.6$ 以下になるとその低下傾向が落ち着く。このことは、間隙中の自由水が連続して存在することができる限度を越えて吸着水が存在すると圧密速度が水の粘性のみによって支配されている可能性を示す。
- (4) 本研究で新たに提示した間隙水の評価

方法は、従来の物理試験と比較して直接的である。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 3 件)

堀家直也・伊藤譲：飽和細粒土の透水係数と凍結試験から得られる間隙特性の関係について、材料学会第 9 回地盤改良シンポジウム論文集, pp.321-326, 2010.

伊藤譲・堀家直也：飽和細粒土の透水係数と凍結試験から評価される間隙比の関係、材料, Vol.61, No.1, pp.85-88, 2012.

佛圓典史・伊藤譲：細粒土における凍結試験と圧密特性との関係について、第 10 回地盤改良シンポジウム論文集, pp.169-172, 2012.

[学会発表] (計 9 件)

佛圓典史・伊藤譲：飽和細粒土における凍結試験から得られる指標とコンシステンシー限界との関係について、第 67 回土木学会年次学術講演会, pp.263-264, 2012.

伊藤譲・佛圓典史：飽和細粒土における透水性と吸着水との関係について、第 47 回地盤工学研究発表会, pp.303-304, 2012.

堀家直也・佛圓典史・伊藤譲：凍結試験から得られる細粒土の透水係数を表す指標について、第 66 回土木学会年次学術講演会, pp.805-806, 2011.

伊藤譲・佛圓典史・堀家直也：凍結試験から粘性土の一軸圧縮強さのメカニズムを知る方法、第 46 回地盤工学研究発表会, pp.285-286, 2011.

[図書] なし
[その他] なし

6. 研究組織

(1) 研究代表者

伊藤 譲 (ITO YUZURU)

研究者番号：30281752

(2) 研究分担者 なし

(3) 連携研究者 なし