

機関番号： 17401

研究種目： 基盤研究 (B)

研究期間： 2008～2010

課題番号： 20360213

研究課題名 (和文)

下水管渠破損による周辺地盤のゆるみ領域発生メカニズムの解明とその対策工の提案

研究課題名 (英文)

Study on the loosening mechanism of the ground due to aging of sewerage pipes and its countermeasure methods

研究代表者

大谷 順 (OTANI JUN)

熊本大学・大学院自然科学研究科・教授

研究者番号： 30203821

研究成果の概要 (和文)：下水道管渠周辺地盤を小型土槽内に作成し、土槽内において給排水を繰返してゆるみ・空洞の進展を再現させ、その現象について X 線 CT 装置を用いて解明した。また、より実際の現象を再現するために土槽底部に下水管模型を設置し、さらに破損形状および規模の違いによるゆるみ発生メカニズムへの影響について比較検討した。特に破損形状、地盤材料、拘束圧の変化および給水圧に着目し、X 線 CT スキャナを用いてゆるみ・空洞領域の発生メカニズムを 3 次元的に可視化し、それらを定量的に評価することを試みた。

研究成果の概要 (英文)：It has been reported that the roadway surface locally subsides due to settlement in a base course. In most cases, a sewerage pipe exists underneath the subsidence part. In order to understand significant factor on local subsidence at road surface, model test was performed to generate a cavity in the model ground. Water was supplied into each model ground by Toyoura sand from the defect part with a same hydraulic head and soil was drained from the same defect part, which is created on the bottom of model ground. An industrial X-ray computed tomography (CT) scanner was used to scan the condition in the model ground at each step of water supply-drainage cycles; the cavity generation in the model ground was observed 3-dimensionally. The analysis of CT image evaluated the range of loosening area, visually and quantitatively.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2008 年度	10,900,000	3,270,000	14,170,000
2009 年度	2,700,000	810,000	3,510,000
2010 年度	1,100,000	330,000	1,430,000
年度			
年度			
総計	14,700,000	4,410,000	19,110,000

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：地盤工学、X 線 CT、下水管渠、地盤防災、対策工

## 1. 研究開始当初の背景

近年都市部において年間数千件も発生している道路陥没事故は、降水量と道路下部に施工される下水道管渠の破損に原因があると考えられている。水道やガス工事による下

水道管渠への損傷、取付管・埋め戻し等の施工不良という初期条件や付加条件に加え、施工後の交通荷重や土被り圧による載荷状態が下水道管渠に蓄積することによって、管渠の老朽化が進むと推測される。そして最終的

に管渠の破損にまで至ると、破損部より局所的な土砂流出が発生し、管渠上部周辺地盤においてゆるみ・空洞が形成され、やがて道路陥没を引起すと考えられる。これらについて、いくつかの実験的研究がこれまで実施されているが、対象挙動が地盤内部のため、その現象の可視化や定量的評価にある程度の限界が生じている。結果として、3次元的地盤のゆるみや空洞の発生メカニズムについては未だ解明されておらず、空洞規模の定量的な評価についても明らかにされていない。

## 2. 研究の目的

本研究の目的は、下水道管渠周辺地盤を対象として、下水道管渠の破損部形状をパラメータとした破損部からの給排水による地盤のゆるみ発生メカニズムの解明である。本論文では、地盤材料の内部挙動を非破壊かつ3次元的に把握可能な産業用 X 線 CT スキャナを用いて、給排水により発生する地盤のゆるみ領域を3次元的に可視化し、さらにそのゆるみ領域を画像解析手法により定量的に評価する。

## 3. 研究の方法

### (1) 実験方法

図-1(a)は、管渠より地盤内に水が給排水していく現象を模擬するために開発した模型実験装置と各種下水管の破損部形状の概略図である。ここでは下水管の破損部形状に着目し、基本破損モデルとしての正方形(5.0mm×5.0mm)(図-1(b))および実際の破損形状に近い管軸方向破損モデル(図-1(c))と円周方向破損モデル(図-1(d))の3形状について実験を実施した。下水管模型の寸法は半径25.0mm×長さ80.0mmであり、管模型の管軸方向(5.0mm×50.0mm)と円周方向(5.0mm×半円全部)に開口部を設けた。地盤材料については基本的現象を把握する目的として、豊浦砂を使用した(相対密度80%)。模型土槽の寸法と材質については、X線CT実験の条件を考慮して決定した(高さ100mm、内径130mmの円筒形、アクリル材)。

### (2) 単調給水・単調排水実験

単調給水・単調排水実験とは、管渠より地盤内に水が単調に流入または飽和状態の地盤から単調排水していく現象を想定した基礎実験である。まず単調給水実験では、初期含水比10%の豊浦砂を1層2.5cmとして突き固め、計4層、総厚10cmの地盤を作成した。予備実験より地盤天端まで水が到達する給水量はおよそ250ccという結果を得ている。

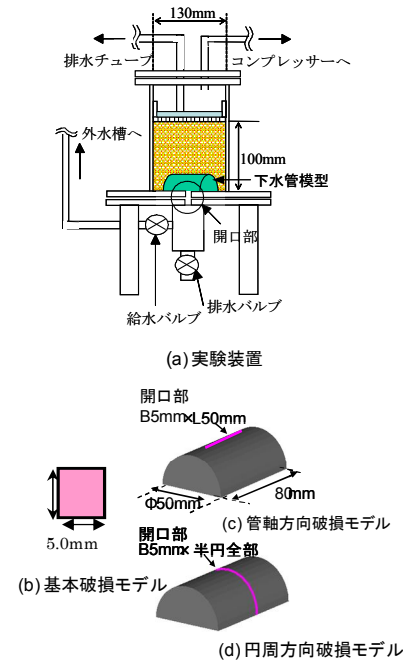


図-1 実験装置および破損モデルの開口部形状

よって、ゆるみ領域の進行過程を3段階に分けて評価するため、1サイクル80cc、計3サイクル240ccの単調給水を行った。一方、単調排水実験では開口部にろ紙を設置していないため、排水バルブ開放時には排土が許され、これを土砂流出と模擬した。排水バルブを開いて、排土・排水が終了するまでを1サイクルとした。開口部開放時間は3秒間とし、計3サイクル9秒間の単調排水を実施した。各実験では、模型地盤の3次元画像を再構成するために、1サイクル終了後に模型地盤底部より1mm間隔で連続CT撮影を実施した。

### (3) 給排水繰り返し実験

給排水繰り返し実験とは、実際現象を考慮して、降雨時には管渠破損部より管内の水圧で水が管渠上部周辺地盤に流入し、その後降雨が終わり管内の水圧が減少した際に管渠周辺の地盤が破損部より管内に流出することを想定した実験である。ここでは開口部から給水と排水を繰り返す条件に、図-1に示すような2種類の破損開口部が異なる下水管模型(管軸方向破損と円周方向破損)を取り付けた。地盤作成後、給水バルブを開き地盤内に100ccの給水を行い、給水後一定の停止時間(1分間)を設けた後、模型土槽下部の排水バルブを開き排水および排土させた。また排水終了後、模型地盤底部より連続CT撮影を実施した。なお、地盤内に給水を行い排水後のCT撮影終了までを1サイクルとし、3サイクル終了した時点で実験を終了した。

(4) 実験ケースおよび実験条件

表-1 は、実施した実験ケースおよび実験条件を示している。本実験では外側に水槽を設け、水頭差 1m の水圧によって模型地盤内部に給水させるように水位を制御した。また、下水道管が地下に埋設されていることを考慮し、模型地盤には 1m 相当の土被り圧 (10kPa) を与えた。

4. 研究成果

(1) 現象の解明

① 単調給水実験結果

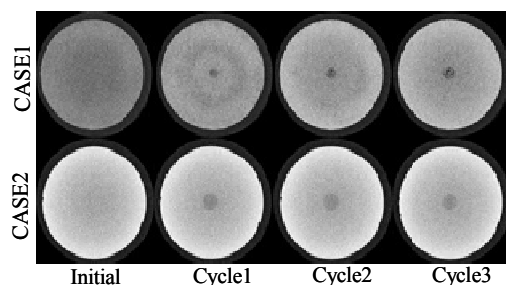
CASE1 および CASE2 の土槽下端より 5mm の位置での CT 画像を図-2(a) に、土槽下端より 20mm の位置での CT 画像を図-2(b) に示す。CT スキャナから得られる一次データは CT 値と呼ばれ、密度に比例するパラメータである。CT 画像はその画像が持つ全 CT 値を 256 階調の白黒濃淡に画像化したものであり、白色ほど密度が高く (高 CT 値)、黒色ほど密度が低い (低 CT 値) ことを意味する。CASE1 および CASE2 において、240cc 給水させた Cycle3 の時点で土槽下端より 5mm 上の位置におけるゆるみ領域の形状は、CASE1 では直径 14.0mm の円状となっている。また、サイクルが増すとゆるみ領域内において、低密度領域が拡大している。しかし、CASE1 ではゆるみ領域は土槽下端より 20mm の位置まで達していない。これは、開口部からの給水は、局所的な間隙への水の流入であるので、給水回数とともに開口部に近い領域の地盤から土粒子の再配列が生じ進行的にゆるみを形成するが、流入水が天端に至っても単調給水ではゆるみは地盤天端まで到達しないと推測される。

② 単調排水実験結果

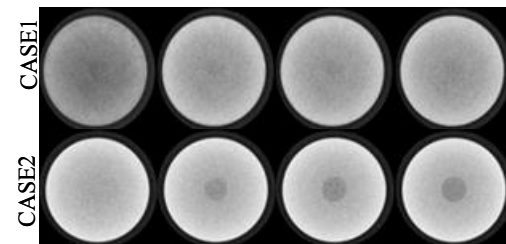
図-2(a) の CASE2 より、9 秒間排水後である Cycle3 の時点で土槽下端より 5mm の位置での中心部のゆるみ領域の形状は円状である。これらの断面画像を高さ方向に重ね合わせて 3 次元画像の再構成が可能であり、さらにその 3 次元画像から任意の面を抽出することが可能である。図-3 は、CASE2 の各サイクルにおけるゆるみ領域の 3 次元縦断面画像である。ゆるみ領域が明確に表せる CT 値 200~500 の範囲で色分けをしている。サイクルが増すと水平方向へのゆるみの拡がりには明確ではないが、鉛直方向への拡がりには明確に確認される。ゆるみ領域の拡がり方として、まず開口部付近では任意の角度で鉛直方向へ拡がり、その後鉛直方向にのみゆるみが拡がり始めると、ゆるみ領域の外周側よりゆるみが進展していくことが推測された。また、Cycle3 におけるゆるみ領域内に周辺部より高い密度

表-1 実験ケースおよび実験条件

CASE	実験装置	開口部形状		給水圧 (kPa)
CASE1	基本型	正方形 (5.0×5.0m)	単調給水	10
CASE2			単調排水	-
CASE3	下水管型	管軸方向破損 (幅5.0mm×長さ50.0mm)	繰り返し給排水	10
CASE4				



a) 土槽下端より 5mm



b) 土槽下端より 20mm

図-2 基本破損形状 (正方形) を用いた場合 (CASE1 および 2) の各サイクルにおける模型地盤の CT 画像

の領域が形成されていることが確認される。

③ 繰り返し給排水実験結果

図-4 および 5 は CASE3、CASE4 の土槽下端より上方 30mm の位置における CT 断面画像を示している。CASE3 は開口部直上より楕円状にゆるみ領域が形成され、給排水サイクルを増すごとにその領域が拡大しているのが確認できる。CASE4 では管模型の両側の開口部からほぼ同心円状にゆるみ領域が形成され、Cycle3 においてはゆるみ領域の 1/4 にも及ぶ空洞領域が確認できる。ゆるんだ領域内に給排水を繰り返し、密度低下が進展することや空洞が形成されることがわかる。このことより開口部形状の違いによって、ゆるみ・空洞領域の断面形状が異なることが確認できた。

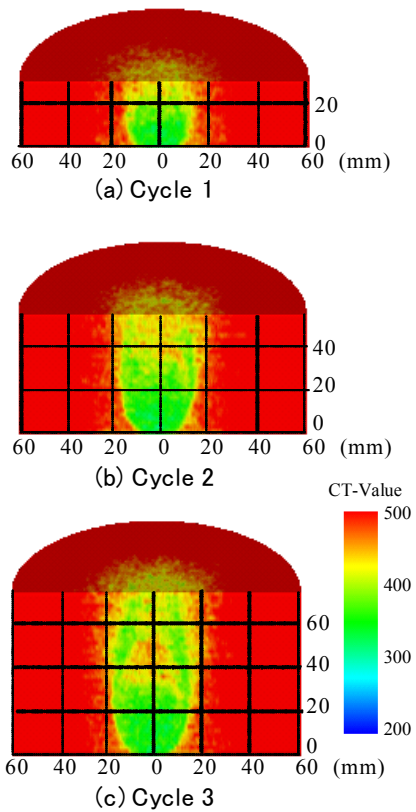


図-3 単調排水によるゆるみ領域の3次元CT画像 (CASE 2)

図-6 は CASE 3、CASE 4 の各サイクルにおけるゆるみ・空洞領域の三次元特徴抽出画像である。視点を真上、斜め上方、正面の三点に設け、それぞれ①、②、③と表している。管模型の半径を  $D$  とおき、ゆるみ・空洞領域の規模について  $D$  を用いて示しているが、ゆるみ・空洞領域は水平方向、鉛直方向に拡大していることがわかる。CASE3 は管模型上方へ楕円状にゆるみが進展している。CASE4 は土槽下端の開口部両側から同心円状に二つのゆるみが拡大し、Cycle3 においてそれら近接している。

(2) ゆるみ程度の定量的評価

研究代表者らは、空洞領域とゆるみ+空洞領域に相当する CT 値の範囲を決定し、その範囲の CT 値を有する画素のみを抽出することによって、それぞれ空洞領域およびゆるみ+空洞領域の体積を図-6 に示す画像から測定するプログラムを新たに開発した。その結果、Cycle1 から Cycle3 にかけてのゆるみ・空洞領域の体積増分は、CASE 3 において 5.2 倍、CASE 4 において 9 倍であることがわかった。次に、この結果を用いて、次式で示すゆるみ程度 (Degree of Loosening: DL 値) を定義した。

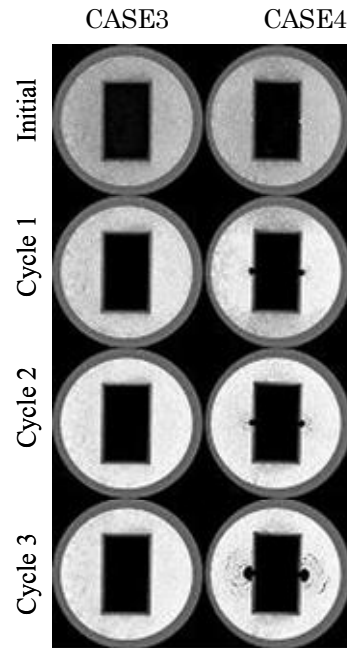


図-4 土槽下端より上方5mmのCT画像

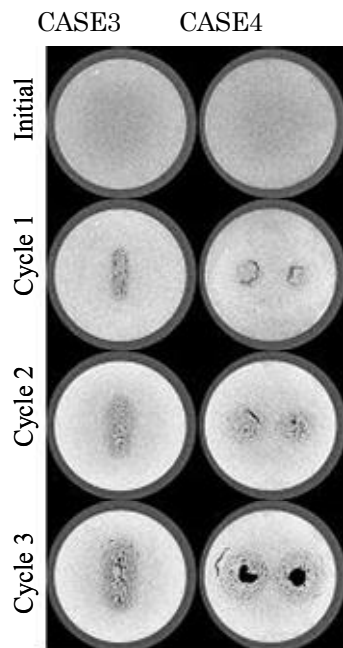


図-5 土槽下端より上方30mmのCT画像

$$DL \text{ 値} = \frac{\text{ゆるみ領域からの排砂量}}{\text{ゆるみ領域の実質重量}} \times 100 (\%) \quad \dots (1)$$

各領域の実質重量は表-2 に示すような各領域の体積と乾燥密度より算出した。上式を用いて各給排水サイクルでの DL 値を算出すると、表-3 に示すように若干ばらつきはあるものの全サイクルにおいてその平均値は、CASE3 では 24%、CASE4 では 22% となった。こ

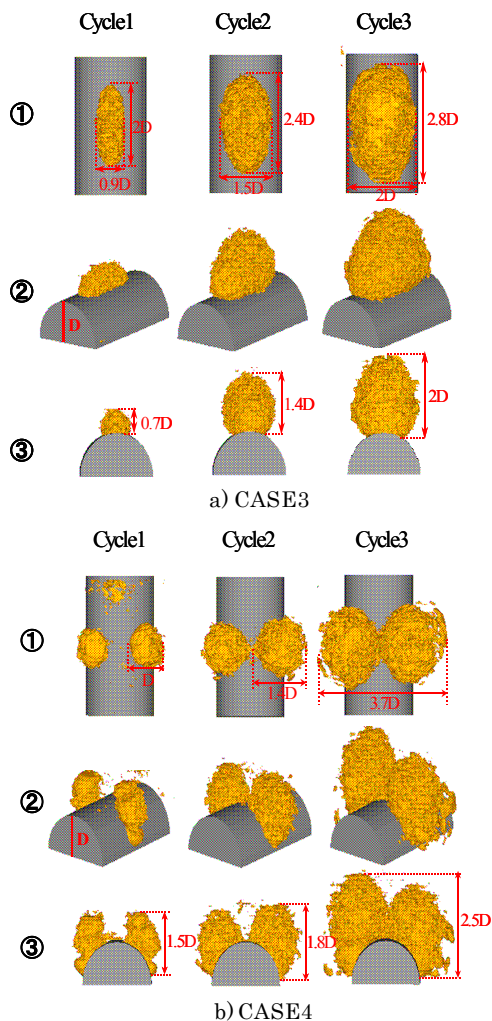


図-6 ゆるみ・空洞領域の三次元特徴抽出画像

の値より模型管渠の開口形状が異なり、ゆるみ・空洞領域の形状に相違があっても、ゆるみ領域に対するゆるみ領域からの排砂量は全サイクルを通じてほぼ一定で約 20%であり、このことから空洞の周りのゆるみ領域はほぼ一定の割合で密度が低下すると評価できる。

### (3) 結論

破損形状の異なる管渠から単調給水、単調排水、そして給排水を繰り返すことによって、管渠周辺地盤のゆるみ・空洞の進展現象を再現した。さらに X 線 CT スキャナを用いてゆるみ領域の形成過程を 3 次元的に可視化し、その領域を CT 画像解析によって定量的に評価した。実現象を想定した給排水繰り返し実験では、開口部形状によってゆるみ形状が異なることが確認された。また、実質ゆるみ領域からの排砂量は全サイクルを通じてほぼ一定であることが明らかとなった。

表-2 各給排水サイクルにおける領域の体積

	領域名	CASE3 (mm <sup>3</sup> )	CASE4 (mm <sup>3</sup> )
Cycle1	ゆるみ領域	10147.2	14018.7
	空洞領域	579.8	4013.1
	ゆるみ・空洞領域	10727.0	18031.8
Cycle2	ゆるみ領域	46096.4	31080.0
	空洞領域	395.3	6751.7
	ゆるみ・空洞領域	46491.7	37831.7
Cycle3	ゆるみ領域	94814.5	70887.6
	空洞領域	1388.2	23598.6
	ゆるみ・空洞領域	96202.7	94486.2

表-3 各給排水サイクルにおけるDL値 (%)

	CASE3	CASE4
Cycle1	31.9	20.0
Cycle2	18.2	21.7
Cycle3	21.9	25.2

## 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 10 件)

- (1) N. Sakata, J. Otani, N. Kumano: Countermeasures on the cavity generation due to water supply and drainage from sewerage defect in the ground -Application of X-ray CT-, Proc. of 5<sup>th</sup> International Workshop on New Frontiers in Computational Geotechnics, 2011(印刷中) (査読有).
- (2) T. Mukunoki, N. Kumano, J. Otani: Failure of sands with different density on defected pipe in X-ray CT images, Proceedings of 14<sup>th</sup> Asian Regional Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, 2011(印刷中) (査読有).
- (3) 高野大樹, 大谷 順 他 3 名: X 線 CT および遠心模型実験を用いた鏡ボルトの切羽面補強効果の検討、土木学会論文集 C (地圏工学)、Vol.67, No.1, 107-118, 2011(査読有).
- (4) 渡邊陽一, 大谷 順 他 2 名: X 線 CT データおよび画像相関法を用いた三軸圧縮下における砂のひずみ場の測定、土木学会応用力学論文集, Vol.13, 487-494, 2010(査読有).
- (5) 天明敏行, 尾原祐三, 堤知明, 村上祐

治: X線 CT 法による硬化コンクリートの特性評価, コンクリート工学年次論文集, Vol. 32, No. 1, 545-550, 2010 (査読有).

- (6) T. Mukunoki, N. Kumano, J. Otani, R. Kuwano: Visualization of three dimensional failure in sand due to water inflow and soil drainage from defective underground pipe using X-ray CT, Soils and Foundations, Vol. 49, No. 6, 959-968, 2009(査読有).
- (7) N. Kumano, T. Mukunoki, J. Otani: Evaluation of cavity generation in the ground due to water supply from sewerage defect using X-ray CT, Proceedings of International Joint Symposium on Geodisaster Prevention and Geoenvironment in Asia JS-Fukuoka, 167-170, 2009(査読有).
- (8) T. Mukunoki, K. Nagata, M. Shigetoku and J. Otani : Visualization of leakage behavior through a hole in geomembrane, Proceedings of IS Kyoto, 395-398, 2009 (査読有).
- (9) Y. Watanabe, J. Otani, N. Lenoir, D. Takano, and T. Mukunoki, Visualisation of strain fields in sand under triaxial compression, Theoretical and Applied Mechanics Japan, Vol. 57, 119-124, 2008(査読有).
- (10) 前野保一, 川野龍一, 姜聲承, 尾原祐三: 室内引抜試験におけるケーブルボルトの力学的挙動, Journal of MMIJ, Vol.124, 756-764, 2008 (査読有).

[学会発表] (計 7 件)

- (1) 坂田直樹、大谷 順、熊野直子、椋木俊文: 下水道管渠破損に起因する地盤内への給排水が引き起こす道路陥没の対策工に関する研究: 土木学会西部支部研究発表会、九州工業大学、493-494, 2011年3月5日 (優秀発表賞) .
- (2) J. Otani: Introduction of X-ray CT application on geotechnical engineering -theory and practice-, invited lecture, 9<sup>th</sup> World Congress on Computational Mechanics, Sydney, Australia, International Convention Centre, 2010年7月23日.
- (3) 熊野直子、椋木俊文、大谷 順: 破損下水道管渠による異なる給排水繰返し条件に着目した地盤内空洞進展メカニズ

ムの解明、第 45 回地盤工学会年次発表会、地盤工学会、愛媛大学、1303-1304、2010年8月20日 (優秀発表賞) .

- (4) 熊野直子、椋木俊文、大谷 順: ” X線 CT 用模型実験装置を用いた異なる下水管破損部からの水の流出入による周辺地盤変状の解明”、第 44 回地盤工学研究発表会、関東学院大学、1299-1300、2009年8月19日.
- (5) 熊野直子、椋木俊文、大谷 順: “破損下水道管渠に起因する地盤変状解明のための X線 CT 用模型実験装置の試作”、土木学会西部支部研究発表会、長崎大学、431 - 432, 2009年3月4日.
- (6) 熊野直子、竹林泰佑、椋木俊文、大谷 順: “破損開口幅の違いによる破損下水道管渠周辺地盤の崩壊機構の考察”、土木学会第 63 回年次学術講演会、東北大学、741-742, 2008年9月11日 (優秀発表賞) .
- (7) 熊野直子、竹林泰佑、椋木俊文、大谷 順: “最大粒径の違いによる破損下水道管渠周辺のゆるみ発生機構の評価”、第 43 回地盤工学研究発表会、国際会議場、1505-1506 , 2008年7月11日 (優秀発表賞).

[図書] (計 2 件)

- (1) 坂田 直樹: 下水道管渠破損に起因する地盤内への給排水に伴う地盤変状の抑止対策工に関する研究, 平成 21 年度熊本大学工学部社会環境工学科卒業論文, 2010 (14 頁).
- (2) 熊野直子: X 線 CT 用模型実験装置を用いた破損下水道管渠に起因する地盤陥没の解明に関する研究, 熊本大学大学院自然科学研究科平成 20 年度修士論文, 2009 (20 頁).

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

大谷 順 (OTANI JUN)  
熊本大学・大学院自然科学研究科・教授  
研究者番号: 30203821

### (2) 研究分担者

尾原 祐三 (OBARA YUZU)  
熊本大学・大学院自然科学研究科・教授  
研究者番号: 50135315  
椋木 俊文 (MUKUNOKI TOSHIFUMI)  
熊本大学・大学院自然科学研究科・准教授  
研究者番号: 30423651