

研究種目：基盤研究（B）

研究期間：2006～2008

課題番号：18360427

研究課題名（和文）オールマイティー地圧計測・評価システムの開発

研究課題名（英文）Development of in-situ stress measurement method having high applicability

研究代表者

坂口 清敏 (SAKAGUCHI KIYOTOSHI)

東北大学・大学院環境科学研究科・講師

研究者番号：50261590

研究成果の概要：

地下深部の地圧（地下岩盤に作用している圧力）を正確に測定できる測定技術の開発を目的とした研究を行った。大まかに見れば、岩盤は均質で等方な弾性体としての性質を持つと仮定でき、研究対象とした測定方法はこの仮定に基礎を置く。しかし実際は、岩盤は多かれ少なかれ不均質であり、異方性（方向によって力学的性質が異なる）の性質を持っている。本研究では、このように複雑な岩盤であっても高精度に地圧を測定できる測定理論と技術を開発した。

交付額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2006年度	7,000,000	2,100,000	9,100,000
2007年度	6,400,000	1,920,000	8,320,000
2008年度	1,900,000	570,000	2,470,000
年度			
年度			
総計	15,300,000	4,590,000	19,890,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：総合工学・地球・資源システム工学

キーワード：地殻工学，地圧計測

1. 研究開始当初の背景

地球環境と調和した人類の文化的・経済的活動を維持するためには、地下の有効利用は最も現実的な施策の一つである。石油やLPGなどの地下貯蔵、揚水式地下発電所空洞などに代表されるように、既に実現しているものもある。しかしながら、地下の有効利用の社会的要請は、地熱エネルギーの抽出、放射性廃棄物の地層処分、二酸化炭素の地中貯留などに代表されるように、より深く、より広く、そして、より高度にと更なる展開を求めている。このように地下を有効に利用するために

は、地圧と呼ばれる地下岩盤中に作用している応力を正確に把握することが重要なテーマとなる。地圧測定の要請は、大深度における高精度測定のみならず、浅部の軟岩地域における測定、不均質岩体における測定、異方性を有する岩体における測定、高温岩体における測定、さらに、これらの複合環境における測定など、より複雑、かつ過酷な環境への適用が要求されてきている。しかしながら、これら要求に応え得る高精度地圧測定法は未だ存在しない。

2. 研究の目的

本研究では、研究代表者がこれまで進めてきた応力解放法に基づく測定手法をさらに拡張・発展させ、1000m以深における大深度測定のみならず、複雑な地下環境にも適用可能な、高精度地圧測定・評価システムを開発することを目的とする。

3. 研究の方法

まず、開発研究をしてきた1000m以深に適用可能な下向き円錐孔底ひずみ法の問題点を完全に解決し、実用的な地圧計測法として完成させる。さらに、本測定法を基礎として当初研究目的を達成できる測定システムを提案する。具体的には以下の方法に従って進めた。

- (1) 下向き円錐孔底ひずみ法の小型化
 - ①HQサイズボアホール対応のためにストレインセル貼付装置の改良。
 - ②ストレインセル貼付装置上部の方位・傾斜測定装置の小型高精度化。
 - ③孔内用データロガーの短尺化。
 - ④孔底加工用の円錐ビットのHQサイズ対応化。
 - ⑤HQサイズ用ひずみ感度係数の数値解析。
- (2) 下向き円錐孔底ひずみ法の高精度化
 - ①ストレインセル貼付用接着剤が測定感度に及ぼす影響の数値解析による定量化。
 - ②ひずみ測定感度の校正試験方法の開発。
- (3) 現場適用試験による測定性能評価。
- (4) 軟岩体での測定を可能にする展開研究。
- (5) 直交異方性岩盤へ適用するための測定理論の構築。
 - ①回収コアから岩石の異方性の主軸および弾性係数を決定する方法の提案。
 - ②測定理論に基づく測定精度の検証実験。

4. 研究成果

(1) 従来の下向き円錐孔底ひずみ法の小型化（ボアホールの小口径化と測定装置の短尺化）を目的とした研究として、以下の改良、開発を行い、ボアホール口径のHQサイズ（直径約98mm）化および測定装置の約150mm実の短尺化に成功し、実用性の高い測定方法として完成させた。

- ①孔底形状変化に伴い、特殊円錐ビットを製作した。
- ②外管の小口径化を行い、先端形状を改良した。
- ③小口径化の支障となる従来の方位・傾斜測定システムをやめ、方位・傾斜測定機能付データロガーを開発した。
- ④小口径化で減少した外管等の質量は上に錘を載せる事によって補った。
- ⑤ボンベホルダとデータロガーケースの新

しい連結方法を開発した。

- ⑥データロガーを短尺化した。
- ⑦測定装置の重心をより孔底側にするため、データロガーとバッテリーの位置を変更した。
- ⑧データロガーの連続動作時間を延長する改良を行った。
- ⑨孔底にたまったスライム除去の効率を高めるため、内管先端の切り込みを深くした。
- ⑩ボンベホルダとデータロガーケースを任意の角度に連結する連結方法に改良した。図1に開発した特殊円錐ビット（左）および16素子ストレインセル（右）を、図2に小型化した装置の全容図（各部品を組み立てない状態）を示す。



図1 開発したHQサイズ対応円錐ビット（左）とストレインセル（右）



図2 小型化した測定装置一式

(2) 下向き円錐孔底ひずみ法の高精度化を目的として、ストレインセルを孔底に貼付する際に使用する接着剤が測定精度に及ぼす影響を数値解析により評価した。具体的には、使用する接着剤の力学特性の時間依存性が測定感度に及ぼす影響を室内試験によって検証した。また、接着剤およびストレインセルも組み入れた解析モデル（図3）によって室内検証試験の結果を正しく評価できるひずみ感度係数を決定することにより、接着剤等の力学特性を定量化した。

その結果、ストレインセル貼付2時間後の室内検証試験を最も良く評価する接着剤のヤング率は1.45 MPa、ポアソン比は無視で

図7にデータロガーの測定モード開始からオーバーコアリング終了後にコアを回収してデータロガーの電源をOFFにするまでのひずみの測定結果の一例を示す。接着剤の硬化を待ち、貼付装置を回収する際にひずみに大きな変化が見られる。これは貼付装置による押し付け圧が取り除かれたためである。水送りの開始時、終了時にもひずみの変化が見られる。これは、孔底近傍に勢いよく水が送られるため、一時的に圧力加わったためと考えられる。また、ロッドの回収時及び、コアチューブの挿入時に規則正しい乱れが見られるが、これはロッドのネジきりをする際に出る振動を拾った結果である。

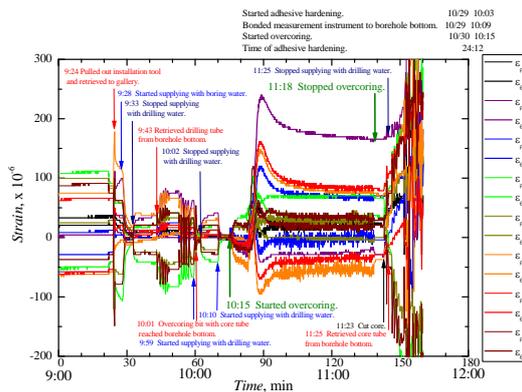


図7 測定開始直後からのひずみ測定結果

図8は、図7からオーバーコアリング中のひずみ測定結果を、オーバーコアリングの進行距離を横軸にして図示したものである。横軸の0 mmの位置は、ひずみゲージが貼付されている位置を示す。

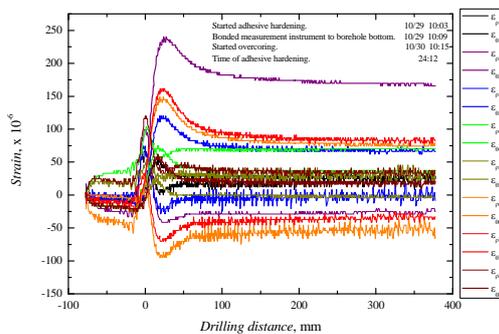


図8 オーバーコアリングに伴う孔底ひずみ変化

稜線方向ひずみ(ϵ_p)の予想される挙動は、オーバーコアリング用ビット先端がゲージに差し掛かる直前に応力が解放され、ゲージ近傍で圧縮応力がかかるという挙動である。円周方向ひずみ(ϵ_d)の予想される挙動はゲージ近傍で応力が解放されるという挙動である。オーバーコアリングの内径が63.5 mmと小さいため、測定ひずみに悪影響を与える可能性が危惧されたが、全体的に予想される挙動を

しめしており、HQサイズの小口径でも問題なくオーバーコアリングできることが確認できた。また、大きいもので 100×10^6 以上のひずみの振動が見られた改良前の方法に比べ、ボーリングによる振動の影響は、装置の短尺化により減少した。

図9に応力の評価結果を下半球投影で示す。最大主応力の方向はJAEAによって測定された他の手法による結果と整合していた。応力の大きさは全体的に小さく評価されたその原因は接着剤の厚さにあると考えられ、接着剤の厚さを0.2mmから0.3mmへと厚くしたところ、特にNo.5については、鉛直応力が7.9 MPaとなり被り圧とほぼ等しくなった。中間主応力と最小主応力については、方向は入れ替わっているものの、JAEAが近傍で円錐孔底ひずみ法により測定した値とほぼ同じであった。しかし、接着剤の力学的特性は、同一の養生時間であっても環境温度や貼付厚さによって大きく影響されることが改めて確認された。この問題の解決のためには原位置試験で校正試験を行う必要があると考えられた。

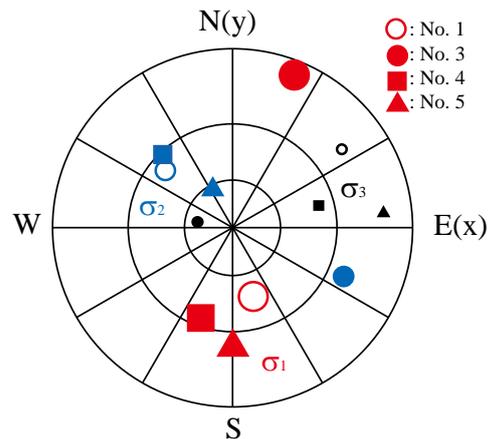


図9 主応力の結果 (下半球投影)

(4) 軟岩への適用に関する展開研究

円錐孔底ひずみ法は、本来硬岩を対象とした応力測定法であるが、本研究では、様々な環境下での測定を可能にする方法へ発展させるために、間隙が水で飽和された軟岩を対象とする場合の適用方法の検討と室内試験および現場適用試験を行った。その結果、使用する、エポキシ樹脂系接着剤の配合の設定、掘削ずりの除去および感度校正を適切に実施すれば、十分に適用可能であることが明らかとなった。

(5) 直交異方性岩盤への適用に関する研究

異方性の主軸の方向と弾性係数が既知の直交異方性岩盤に対する孔底ひずみと岩盤応力の関係を誘導した。

図10に示すようにグローバル座標系(X, Y,

2), ボアホール座標系 (x, y, z) , 直交異方性の主軸を定義する座標系 (x', y', z') , ボアホール孔底の球座標系 (ρ, θ, ϕ) を定義する。また, 応力テンソル σ_{ij} とひずみテンソル ε_{ij} は対称性を考慮し, 各座標系における応力ベクトルとひずみベクトルを以下のように定義する。

$$\begin{aligned} \{\varepsilon\}_{XYZ}^T &= \{\varepsilon_X \ \varepsilon_Y \ \varepsilon_Z \ \gamma_{YZ} \ \gamma_{ZX} \ \gamma_{XY}\} \\ \{\varepsilon\}_{xyz}^T &= \{\varepsilon_x \ \varepsilon_y \ \varepsilon_z \ \gamma_{yz} \ \gamma_{zx} \ \gamma_{xy}\} \\ \{\varepsilon\}_{x'y'z'}^T &= \{\varepsilon_{x'} \ \varepsilon_{y'} \ \varepsilon_{z'} \ \gamma_{y'z'} \ \gamma_{z'x'} \ \gamma_{x'y'}\} \\ \{\varepsilon\}_{\rho\theta\phi}^T &= \{\varepsilon_\rho \ \varepsilon_\theta \ \varepsilon_\phi \ \gamma_{\theta\phi} \ \gamma_{\phi\rho} \ \gamma_{\rho\theta}\} \\ \{\sigma\}_{XYZ}^T &= \{\sigma_X \ \sigma_Y \ \sigma_Z \ \tau_{YZ} \ \tau_{ZX} \ \tau_{XY}\} \\ \{\sigma\}_{xyz}^T &= \{\sigma_x \ \sigma_y \ \sigma_z \ \tau_{yz} \ \tau_{zx} \ \tau_{xy}\} \\ \{\sigma\}_{x'y'z'}^T &= \{\sigma_{x'} \ \sigma_{y'} \ \sigma_{z'} \ \tau_{y'z'} \ \tau_{z'x'} \ \tau_{x'y'}\} \end{aligned} \quad (1)$$

異方性の主軸座標系 (x', y', z') における構成式は次式で与えられる。

$$\{\varepsilon\}_{x'y'z'} = [H]\{\sigma\}_{x'y'z'} \quad (2)$$

ここで, $[H]$ は 9 個の弾性係数 (E : ヤング率, G : 剛性係数, ν : ボアソン比) によって次式で与えられる。

$$[H] = \begin{bmatrix} \frac{1}{E_{x'}} & -\frac{\nu_{x'y'}}{E_{x'}} & -\frac{\nu_{x'z'}}{E_{x'}} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{\nu_{x'y'}}{E_{x'}} & \frac{1}{E_{y'}} & -\frac{\nu_{y'z'}}{E_{y'}} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\nu_{x'z'}}{E_{x'}} & -\frac{\nu_{y'z'}}{E_{y'}} & \frac{1}{E_{z'}} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{y'z'}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{z'x'}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{x'y'}} \end{bmatrix} \quad (3)$$

$\{\sigma\}_{x'y'z'}$ と $\{\sigma\}_{XYZ}$ には次の関係式がある。

$$\{\sigma\}_{x'y'z'} = [T_\sigma]\{\sigma\}_{XYZ} \quad (4)$$

ここに, $[T_\sigma]$ は座標変換マトリクスである。同様に, $\{\varepsilon\}_{x'y'z'}$ と $\{\varepsilon\}_{XYZ}$ には次式が成り立つ。

$$\{\varepsilon\}_{x'y'z'} = [T_\varepsilon]\{\varepsilon\}_{XYZ} \quad (5)$$

$[T_\varepsilon]$ はひずみに関する座標変換マトリクスであり,

$$[T_\varepsilon]^{-1} = [T_\sigma]^T, \quad [T_\varepsilon]^T = [T_\sigma]^{-1} \quad (6)$$

である。

式(4)と式(5)を式(2)に代入し, 式(6)を用いると, グローバル座標系 (X, Y, Z) に置ける構成式が得られる。

$$\{\varepsilon\}_{XYZ} = [T_\sigma]^T [H] [T_\sigma] \{\sigma\}_{XYZ} \quad (7)$$

次にボアホール座標系 (x, y, z) について考える。 $\{\sigma\}_{xyz}$ と $\{\sigma\}_{XYZ}$ は次の関係式がある。

$$\{\sigma\}_{xyz} = [T_\sigma] \{\sigma\}_{XYZ} \quad (8)$$

ここで $[T_\sigma]$ は座標変換マトリクスであり, x, y, z 方向の単位ベクトルの方向余弦で与えられる。

同様に, $\{\varepsilon\}_{xyz}$ と $\{\varepsilon\}_{XYZ}$ は次の関係式がある。

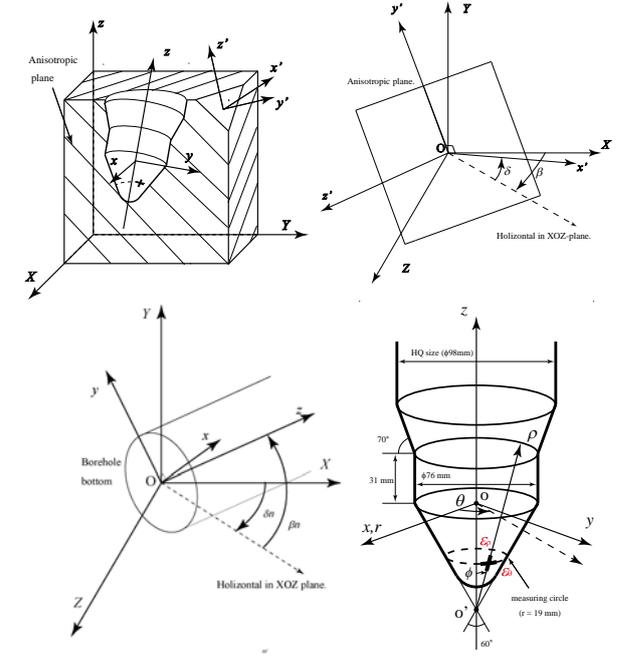


図 10 座標系の定義と測定ひずみ

$$\{\varepsilon\}_{xyz} = [T_\varepsilon] \{\varepsilon\}_{XYZ} \quad (9)$$

$[T_\varepsilon]$ はひずみに関する座標変換マトリクスであり,

$$[T_\varepsilon]^{-1} = [T_\sigma]^T, \quad [T_\varepsilon]^T = [T_\sigma]^{-1} \quad (10)$$

が成り立つ。

式(8)と式(9)を式(7)に代入し, 式(10)を用いると, ボアホール座標系 (x, y, z) に置ける構成式が得られる。

$$\{\varepsilon\}_{xyz} = [T_\varepsilon] [T_\sigma]^T [H] [T_\sigma] [T_\varepsilon] \{\sigma\}_{xyz} \quad (11)$$

ここで,

$$[A] = [T_\varepsilon] [T_\sigma]^T [H] [T_\sigma] [T_\varepsilon] \quad (12)$$

とおけば,

$$\{\varepsilon\}_{xyz} = [A] \{\sigma\}_{xyz} \quad (13)$$

式(13)に式(8)を代入すると, 無限遠方から作用する応力 $\{\sigma\}_{XYZ}$ によってボアホール周りに生ずるひずみの関係式が得られる。

$$\{\varepsilon\}_{xyz} = [A] [T_\sigma] \{\sigma\}_{XYZ} \quad (14)$$

さて, 孔底に定義する球座標系におけるひずみ $\{\varepsilon\}_{\rho\theta\phi}$ とボアホールに定義する直交座標系におけるひずみ $\{\varepsilon\}_{xyz}$ には次の関係がある。

$$\{\varepsilon\}_{\rho\theta\phi} = [T_{\rho\theta\phi}] \{\varepsilon\}_{xyz} \quad (15)$$

ここで $[T_{\rho\theta\phi}]$ は ρ, θ, ϕ 方向の単位ベクトルの方向余弦を用いて表わされる座標変換マトリクスである。

式(14)を式(15)に代入して孔底形状による応力集中も考慮に入れると, 次の観測方程式が得られる。

$$\begin{Bmatrix} \varepsilon_\rho \\ \varepsilon_\theta \end{Bmatrix} = [T_{\rho\theta\phi}] [A] [T_\sigma] \{\sigma\}_{XYZ} \quad (16)$$

ここで $[A]$ は応力集中係数マトリクスであり, 測定位置によって異なり, 16 素子の場合, $[A]_{\theta=0^\circ}, [A]_{\theta=45^\circ}, [A]_{\theta=90^\circ}, [A]_{\theta=135^\circ}$,

$[C]_{\theta=180^\circ}$, $[C]_{\theta=225^\circ}$, $[C]_{\theta=270^\circ}$, $[C]_{\theta=315^\circ}$ の 8 パターンが存在し、16 個の観測方程式が得られる。

応力集中係数は三次元有限要素法などの数値解析で求める。すなわち、 $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z, \tau_{yz}, \tau_{zx}, \tau_{xy}$ の単位の応力成分が独立に作用する場合について、各位置における $[C]$ を求める。

16 個の観測方程式は最小二乗法で解き、応力の最確値 $\{\sigma\}_{XYZ}$ を求める。すなわち、式(16)を

$$[\varepsilon_{\rho\theta}] = [B]\{\sigma\}_{XYZ} \quad (17)$$

$$\{\sigma\}_{XYZ} = [B]^T \cdot [B]^{-1} \cdot [B]^T [\varepsilon_{\rho\theta}] \quad (18)$$

$$\{\sigma\}_{XYZ} = [B]^T \cdot [B]^{-1} \cdot [B]^T [\varepsilon_{\rho\theta}] \quad (19)$$

上述の測定理論の有効性を検証するために、異方性の異なる 4 種類の岩石試料を用いて異方性の主軸がボアホール軸と一致する場合について室内実験を行い、従来の等方理論で応力を評価した場合と本研究で構築した異方性理論で評価した場合の比較を行った。結果を要約すると以下の通りである。

- ① 载荷応力方向の異方性が顕著であった場合、等方性を仮定すると無視できないほどの誤差が生じ、異方性を考慮するとその誤差が小さくなる傾向があることを確認した。
- ② 等方性仮定により生じる応力の大きさの誤差は、载荷応力方向の異方性、特に最大载荷応力方向の異方性に依存する。
- ③ 最大载荷応力方向の異方性が 10% を超える場合に、等方と仮定してしまうと応力の大きさに 10% を超える誤差が生じ、20% を超える場合に等方と仮定する 20% 以上の大きな誤差が生じる恐れがある。
- ④ 回収コアを用いた弾性波速度試験によって主軸の方向と弾性係数を決定する方法に基づいた手法を提案した。

(6) まとめ

本研究の成果を簡潔にまとめると以下の通りである。

- ① 1000m 以深に適用可能な高精度地圧測定法を開発した。
- ② 間隙が水で飽和された軟岩への適用方法を提案し実用性を確認した。
- ③ 異方性岩盤への適用理論を構築し、その有効性を確認した。

本研究成果は、国内外の学会の発表においても注目され、チェコからは研究者が来訪し情報交換を行っている。また国内では、異方性岩盤への適用に関して、民間企業との共同研究へと進展している。

今後は、異方性の主軸とボアホール軸が一致しない場合など、より一般的で複雑な測定環境への適用性を検証し、実用性を向上させる必要がある。

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) 坂口清敏, 後藤匡雄, 竹田英主, 原雅人, 鈴木康正, 松木浩二, 下向き円錐孔底ひずみ法の測定精度に及ぼす接着剤の影響と地圧評価の高精度化, *Journal of MMIJ*, Vol.123, No.2, 68-74, 2007, 査読有.
- 2) 坂口清敏, 吉田宣生, 南将行, 原雅人, 鈴木康正, 松木浩二, 深部地圧計測のための下向き円錐孔底ひずみ法の開発と室内実証試験, *Journal of MMIJ*, Vol.122, No.6,7, 338-344, 2006, 査読有.

[学会発表] (計 5 件)

- 1) 坂口清敏, 竹田英主, 松木浩二, 下向き円錐孔底ひずみ法の直交異方性岩盤への適用に関する研究, 資源・素材 2008 (仙台), 2008 年 10 月 8 日, 仙台国際センター.
- 2) 坂口清敏, 関川絵美子, 大崎豊, 上辻良平, 手塚和彦, 松木浩二, ASR法を用いた勇払油ガス田 4500m 深度における地圧計測, 資源・素材 2007 (名古屋), 2007 年 9 月 27 日, 名古屋大学.
- 3) 坂口清敏, 原雅人, 鈴木康正, 松木浩二, 円錐孔底ひずみ法による測定事例と考察, 第 42 回地盤工学研究発表会, 2007 年 7 月 4 日, 名古屋大学.
- 4) 白鷺卓, 戸井田克, 富田敦紀, 坂口清敏, 堆積軟岩における湧水のある下向きボアホールでの円錐孔底ひずみ法の適用, 資源・素材 2006 (福岡), 2006 年 9 月 12 日, 九州産業大学.
- 5) K. Sakaguchi, H. Takeda, M. Minami, M. Hara, Y. Suzuki and K. Matsuki, Development of downward compact conical-ended borehole overcoring technique for in situ rock stress determination in deep borehole and its application examples., Int. symp. on In-situ Rock Stress, 20 June 2006, Trondheim, Norway.

6. 研究組織

(1) 研究代表者

坂口 清敏 (SAKAGUCHI KIYOTOSHI)
東北大学・大学院環境科学研究科・講師
研究者番号：50291590

(2) 研究分担者

松木 浩二 (MATSUKI KOJI)
東北大学・大学院環境科学研究科・教授
研究者番号：10108475
木崎 彰久 (KIZAKI AKIHISA)
東北大学・大学院環境科学研究科・助教
研究者番号：60344686

(3) 連携研究者