

平成 21 年 6 月 12 日現在

研究種目：若手研究 (A)

研究期間：2006 年度～2008 年度

課題番号：18680054

研究課題名 (和文) 岩石土壌材料における塩害に関する研究

研究課題名 (英文) Study in salt hazards on geosphere materials

研究代表者

小口 千明 (OGUCHI CHIAKI)

埼玉大学・地圏科学研究センター・准教授

研究者番号：20312803

研究成果の概要：

本研究は、種々の塩害対策を講じる際に必要な基礎情報の提供を目的として、野外調査と風化実験から、塩類析出の際の環境条件と塩類溶液物性との関係と、岩石物性との関係を調べたものである。野外調査では気温、相対湿度、壁面温度、析出塩の種類と量、塩類析出に伴う岩盤表面の平均削剥速度を求め、環境条件の相違が塩類鉱物の種類と岩盤削剥速度の違いを決定づけることが明らかになった。各種風化実験では、岩石物性について詳細に調べた主要石材とモルタルを用い、複数種の塩類溶液に浸す実験を行い、石材の劣化は塩類の種類や岩石強度のみならず、間隙径分布の相違により決定づけられることが明らかになった。

交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2006 年度	7,200,000	2,160,000	9,360,000
2007 年度	900,000	270,000	1,170,000
2008 年度	800,000	240,000	1,040,000
年度			
年度			
総計	8,900,000	2,670,000	11,570,000

研究分野：総合領域

科研費の分科・細目：地理学・地理学 (細目表キーワード：地形学)

キーワード：岩石、土壌、塩溶液、硫酸塩、毛管現象、岩石物性、塩類析出、塩類風化

1. 研究開始当初の背景

地球表層には地圏材料 (岩石や土壌等) が天然物・人工物問わず普遍的に存在し、長期間かけてそれらは徐々に風化変質していく。とくに、塩類風化現象においては、岩石からなる露頭の特定の部位に窪みを形成して壁面の不安定化を招き、単なる地形変化のみならず斜面崩壊の原因となったり、土建築物や石造文化財などをも劣化させたりする。古代

より石造の建築文化をもつ欧米では、地理学・地形学関係の大学や研究機関が主導的立場をとりながら、石およびその周辺材料 (地圏材料) の劣化研究を推進してきた。しかしながら、日本においては岩石の風化・劣化を専門とする研究者が稀なため、遺跡や石造建造物の保存修復や、地盤・岩盤の劣化防止のための斜面補強工事などの応用的課題に直面しても、原因究明にまで踏み込んだ対策が取れていない状況である。

2. 研究の目的

本研究の目的は、地圏材料(岩石および土壌)における塩類析出から塩類風化にいたる一連の現象を体系化し、種々の塩害対策を講じる際に必要な基礎情報の提供することである。塩類析出に伴う風化・劣化現象を解決するためには、塩類析出の際の環境条件と塩類溶液物性との関係と、塩類析出時に発生する応力と岩石物性との関係の双方が評価されなければならない。塩類析出時における岩石物性影響については、異なる塩-岩石-環境下における綿密な塩類風化実験を行う必要がある。これらの地道なデータ収集により、特定の材料が塩害を受ける程度を評価することができるようになる。

3. 研究の方法

本研究で行った主要な研究方法は、1) 現地調査による塩類析出状況と岩石・土壌等の劣化状況の把握、および、2) 各種試験による岩石・土壌試料の物性研究と塩類風化実験、である。以下にそれぞれの方法について述べる。

1) 現地調査による塩類析出状況と岩石・土壌等の劣化状況の把握

現地調査研究では、埼玉県にある国指定史跡である吉見百穴(図1)と、フランス・ランス市周辺の教会建築物を調査した。

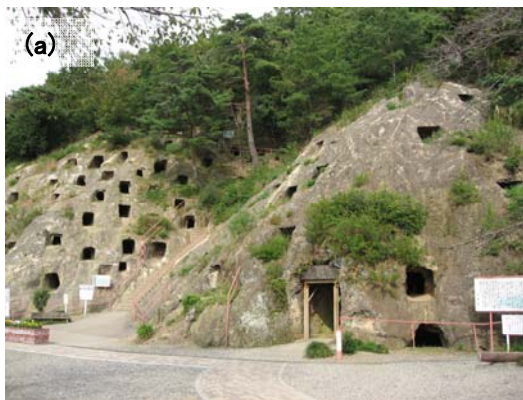


図1 吉見百穴, (a) 概観, (b) 軍需工場跡地に設置した観測サイト

吉見百穴では、需工場跡内に12ヶ所の調査箇所を設置し、約一ヶ月ごとに各地点の壁面の温度、付近の空間の温度と湿度を測定した。また、各通路を代表する site 2、site 8、site 12 にデータロガーを設置し、一時間毎に気温と湿度のデータを収集した。さらに、析出している塩類鉱物を毎月の調査時に各 site より採取して持ち帰り、X線粉末回折分析(XRD)により同定した。崩落した岩屑についても毎月の調査時に採取し、重量測定を行った。まず、採取時の状態での重量を測定し、温度110℃で24時間以上乾燥させた後、再度重量測定を行う。その後水で塩を溶かし、濾過を行い、再び温度110℃で24時間以上乾燥させた後、重量測定を行った。

フランス調査では、教会建築物(図2)を対象として、塩類風化および凍結融解風化の実態を観察し、塩類風化箇所においては析出物を採取しXRD分析により物質を特定した。



図2 フランス・ランス大聖堂

2) 各種試験による岩石・土壌試料の物性調査と塩類風化実験

風化実験では、主要石材として、大谷凝灰岩、Savonnière (サヴォニエール)石灰岩、トラバーチン、ドロマイト、多胡石(粗粒砂岩)、白浜砂岩(中粒砂岩)、インド砂岩(細粒砂岩)、抗火石(多孔質流紋岩)、緑泥石片岩のほか、モルタル2種も用いた。岩石物性の試験項目は、物理的・力学的性質として、かさ密度、真密度、間隙率、有効間隙率、間隙径分布、エコーチップ硬度、一軸圧縮強度、および圧裂引張強度の各試験を行い、鉱物学的性質としてXRDと実体顕微鏡による岩石表面の観察を行った。

石材を用いた実験では、①塩類5種と角柱型石材8種を用いた乾湿繰り返し実験(図3)、②硫酸ナトリウムと円筒型石材4種を用いた凍結融解繰り返し実験(図4)、③塩溶液2種と円筒型モルタル2種を用いた乾湿繰り返し実験(図5)、④海水と円盤型モルタル2種を用いた浸漬実験を行った。

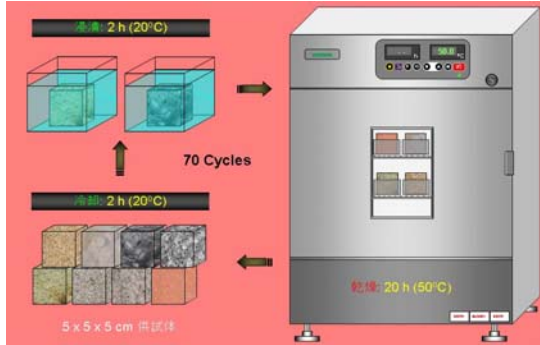


図3 塩類5種と石材8種を用いた乾湿繰り返し実験

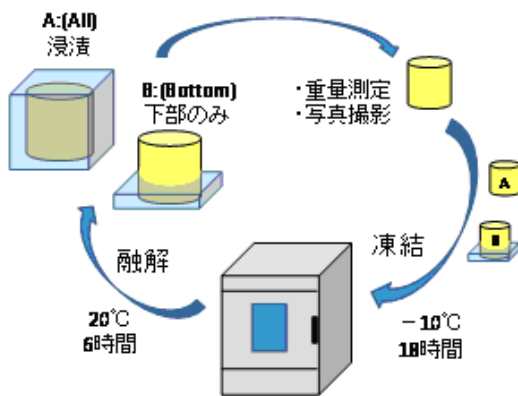


図4 硫酸ナトリウムと石材4種を用いた凍結融解繰り返し実験



図5 塩溶液2種とモルタル2種を用いた乾湿繰り返し実験

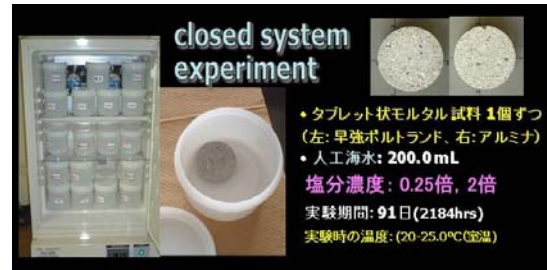


図6 海水とモルタル2種を用いた浸漬実験

4. 研究成果

1) 現地調査による塩類析出状況と岩石・土壌等の劣化状況

吉見百穴においては、入口付近の site 1~4、site 9~12 では主にアルノーゲン(図7)が析出しているのに対し、site 5~8では石膏(G)、ジャロサイト(J)、ハロトリカイト(HT)、ナトリウムミョウバン(SA)が主に析出している。ハロトリカイトはsite 3, 4, 9, 10でも比較的長い期間確認されていることから、入口付近よりもトンネル奥になるほど析出しやすい環境であると考えられる。

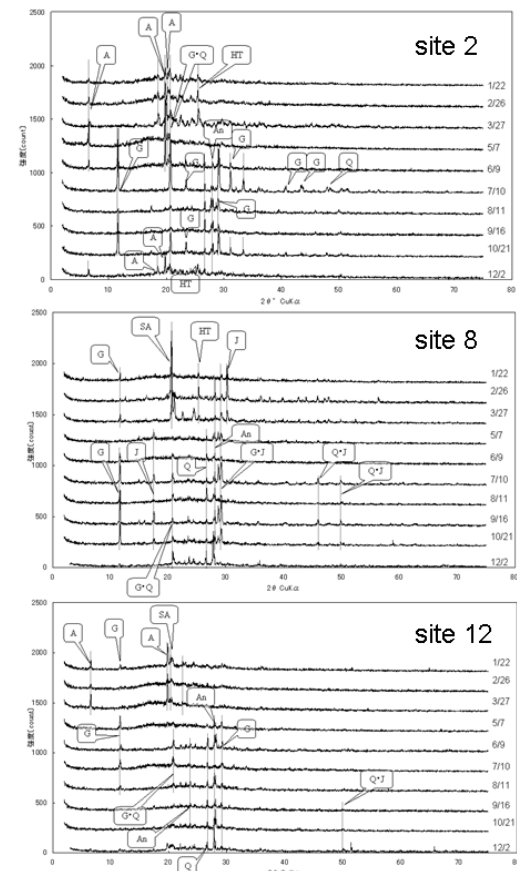


図7 吉見百穴における塩類析出物の季節的・空間的变化

崩落物質の量については、site 1~3は春から夏にかけて崩落量が多く、site 4ではあまり崩落が見られなかった(図8)。春に崩落した岩屑は多量に塩を含んでいるが、夏場の崩落岩屑は塩をあまり含んでいなかった。site 5~8は冬から春にかけて崩落量が多く、site 1~4より早い段階から崩落が始まり、6、7月には崩落量が少なくなっていた。他の2つのエリアと比べると一番崩落量が多く、岩屑は水分が比較的少ない砂状のものがほとんどであった。site 9~12では、site 9、10は2月、3月で崩落量のピークを迎え、site 11、12は5月にピークを迎えている。このことから、入口に近い場所の方が崩落量の多くなる時期が遅いことが判明した。

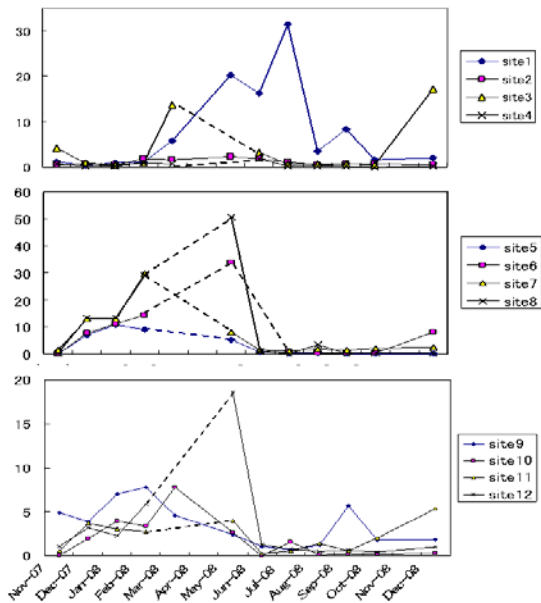


図8 吉見百穴内各サイトからの崩落物質量の経年変化

2) 各種試験による岩石・土壌試料の物性調査と塩類風化実験の結果

各種石材の物理的・力学的物性の試験結果を表1に示す。また、角柱型石材を用いた塩類風化実験の結果の一例を図9に示す。

表1 各種石材の岩石物性

測定項目		凝灰岩	白浜砂岩	石灰岩	結晶片岩
かさ密度	(g/cm ³)	1.44	2.28	1.63	2.95
真密度	(g/cm ³)	2.36	2.67	2.71	2.97
間隙率	(%)	38.69	14.56	39.97	0.47
有効間隙率	(%)	20.28	4.99	18.00	0.35
エコーチップ硬度	(Ld)	377	496	198	555
圧縮強度	(MPa)	15.43	54.07	12.62	—
引張強度	(MPa)	1.85	3.28	1.41	10.53

これは完全に供試体を浸した実験であったが、最も劣化させると考えられている塩(硫酸ナトリウム)が必ずしも全ての石材において最も劣化させているとは限らない結果となった。すなわち、石材と塩溶液の種類との兼ね合いで、塩類風化特性が異なることを示している。

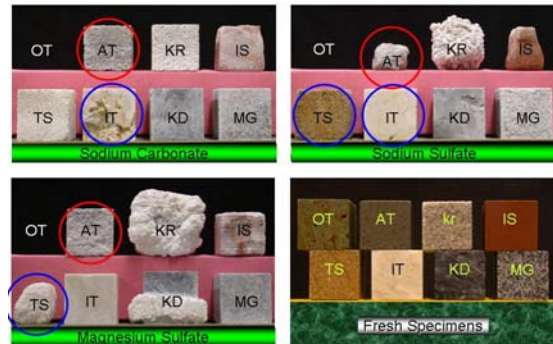


図9 角柱型石材による塩類風化実験の結果

硫酸ナトリウムと円筒型石材4種を用いた凍結融解繰り返し実験では、出発物質の岩石物性値調査(表1)から、間隙率が大きいほど、また引張強度が低いほど凍結破碎しやすいために石灰岩と凝灰岩が破碎すると予測されたにもかかわらず、サヴォニエール石灰岩はほとんど劣化していなかった。破碎の生じた大谷石供試体(図10)では、エコーチップ硬度試験や圧裂引張試験結果において強度低下が見られた。また、間隙径分布測定では、図11のように直径が大きい間隙が増えていた。



図10 円筒型石材による凍結融解繰り返し実験の結果(赤矢印は顕著な劣化箇所)

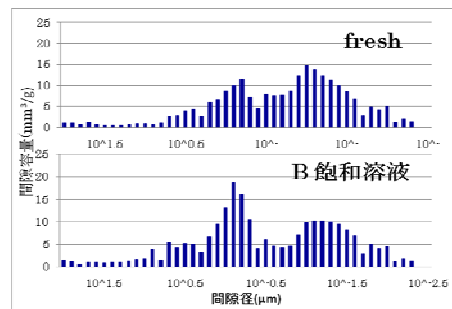


図11 実験前後の間隙径分布の変化(大谷石凝灰岩)

これは、大谷凝灰岩が小さな間隙をより多く持つ石材であることで説明できる。すなわち、氷晶の形成は大きな間隙から小さな間隙へ成長していくため、氷晶形成が早いことに加え、氷の体積膨張圧が間隙に与える力も強くなり凍結破砕が生じたと考えられる。

図 12 は、塩溶液 2 種と円筒型モルタル 2 種を用いた乾湿繰り返し実験の結果を示したものである。2 種のモルタルのうち、海水に対して耐性があるのは早強ポルトランドセメントモルタルであり、硫酸ナトリウムに対して耐性があるのはアルミナセメントモルタルであった。海水で実験を行ったアルミナセメントモルタルでは、15 サイクル頃から重量が減少し始め、25 サイクル以降ではほぼ横這いとなった。一軸圧縮強度については、重量減少より先行して 7 サイクルには強度低下が起こり、以降、初期強度の 6~8 割程度で推移した。エコーチップ硬度は、強度ほどの低下率ではなかったものの、初期硬度の 8~9 割程度を推移した。硫酸ナトリウムで実験を行った早強ポルトランドセメントモルタルは、劣化が激しく表面剥離が進んだため、重量は 5 サイクル以降急激に減少した。一軸圧縮強度およびエコーチップ硬度についても、その低下率は他のモルタル-溶液組み合わせと比較し顕著であった。

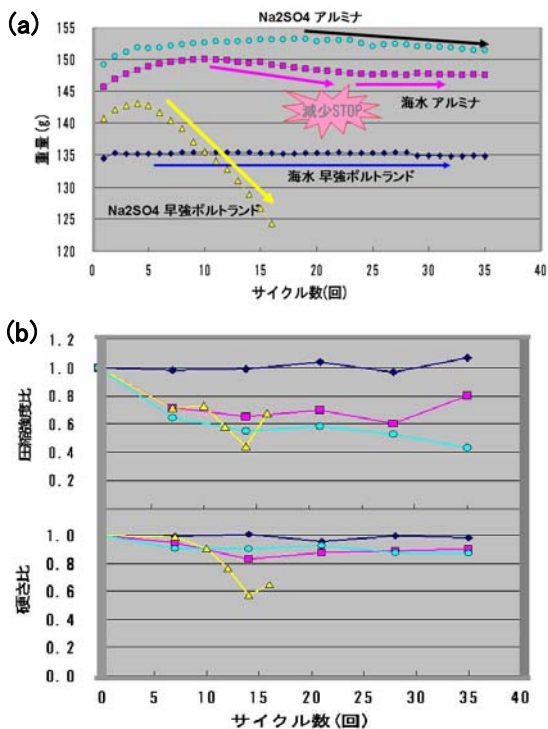


図 12 塩溶液 2 種と円筒型モルタル 2 種を用いた乾湿繰り返し実験の結果 (a) 重量減少、(b) 一軸圧縮強度の低下率 (上) およびエコーチップ反発値の低下率 (下)

図 13 は、海水と円盤型モルタル 2 種を用いた浸漬実験後のモルタル断面の電子顕微鏡写真および元素マッピング写真である。針状の物は Ca を多く含む物質であり、針状の物質上部の団子状の物質と下部に付着している塵状の物は Mg を多く含んでいた。XRD 結果も考慮すると、針状の物はアラゴナイト、団子状および塵状の物はブルーサイトであると考えられる。

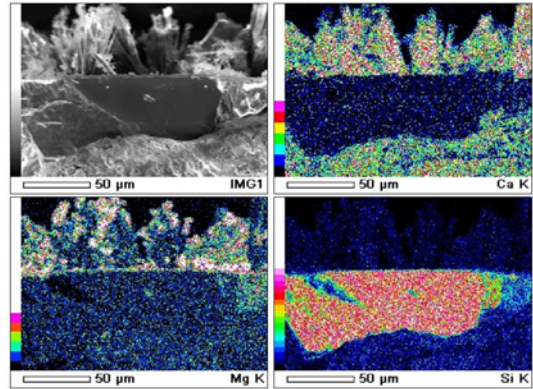


図 13 海水と円盤型モルタル 2 種を用いた浸漬実験後のモルタル断面の SEM-EDS 画像

以上より、モルタルは、海水に浸漬させ続けた場合には表面にブルーサイトおよびカルサイトが生成されたのに対し、乾湿繰り返し下ではそれらはほとんど見られず、別のメカニズムが働いていることが判明した。海水にて浸漬/乾燥を繰り返した場合にはアルミナセメントモルタルのほうがわずかに強度低下が起こっていたのに対し、硫酸ナトリウム溶液の場合には、早強ポルトランドセメントモルタルの重量減少と強度低下が著しかった。これは、モルタルに対しても硫酸ナトリウムの析出がいかに甚大な被害をもたらすものかを示すものである。

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 6 件)

- ① Yu, S. and Oguchi, C.T. (2009): Is sodium sulfate invariably effective in destroying any type of rock? Geological Society of London, Special Publication, (査読あり), in press.
- ② Yu, S. and Oguchi, C.T. (2009): Role of pore size distribution in salt uptake, damage, and predicting salt susceptibility of eight types of Japanese building stones. Engineering Geology, (査読あり), in press.
- ③ 高屋康彦, 青木卓朗, 小口千明 (2008): 海水によるモルタルの表面変質に関する

一実験, 粘土科学, (査読あり), vol. 47, pp. 25-33.

- ④ Oguchi, C.T. and Yuasa, H. (2008): Effects of Rock Properties on Salt Weathering of Oya tuff - An Experimental Study. Geological Society of London, Special Publication, (査読あり), 印刷中.
- ⑤ Song, W., Ogawa, N., Oguchi, C.T., Hatta, T. and Matsukura, Y. (2007): Effect of Bacillus Subtilis on granite weathering: a laboratory experiment. Catena, (査読あり), vol.70, pp.275-281.
- ⑥ Oguchi, C.T., Matsukura, Y., Shimada, H. and Kuchitsu, N. (2006): Application of weathering susceptibility index to salt damage on a brick monument. Heritage, Weathering and Conservation, Fort, A. B., Gomez, H. and Vazquez, C (eds), Taylor & Francis Group, London, (査読あり), pp. 217-227

[学会発表] (計 15 件)

- ① Oguchi, C. T., Damdindorj, D. and Takaya, Y. (2008): Coal Characterization and the predicted environmental influence due to mining on Tavantolgoi Coal Mine in Mongolia. International Symposium on Environmental Management, Nakorn Nayok (Thailand), CD-rom.
- ② Takaya, Y. Aoki, T. Nakayama, T. and Oguchi, C. T. (2008): Experimental study on surface alteration of limestone and mortar attacked by seawater, International Symposium on Environmental Management, Nakorn Nayok (Thailand), CD-rom.
- ③ Swe Yu and Oguchi, C. T. (2008): Is sodium sulfate always the most effective salt in destroying any type of rock?, European Geosciences Union, General Assembly 2008, Vienna (Austria), CD-rom.
- ④ Oguchi, C.T. and Yamada, T. (2008): Study in salt weathering on concrete: field observation and experiment, European Geosciences Union, General Assembly 2008, Vienna (Austria), CD-rom.
- ⑤ 小口千明・ダンディンドルジ デジデマ (2008): GIS による基礎調査と含有鉱物調査からみたモンゴル・タバントルゴイ炭鉱開発に伴う環境劣化予測, 日本地球惑星科学連合 2008 年合同大会, 幕張メッセ(千葉), CD-rom.
- ⑥ 小口千明, 大西亮平, Thidar Aye, 高屋康彦, Swe Yu (2008): 史跡吉見百穴の温湿

度環境に伴う塩類風化に関する研究, 日本地球惑星科学連合 2008 年合同大会, 幕張メッセ (千葉), CD-rom.

- ⑦ 高屋康彦, 中山丈士, 小口千明, 八田珠郎 (2008): 海水によるモルタルの表面変質に関する一実験, 日本地球惑星科学連合 2008 年合同大会, 幕張メッセ (千葉), CD-rom.
- ⑧ 高屋康彦・中山丈士・小口千明・八田珠郎 (2008): 海水によるモルタルの表面変質に関する実験的研究, 日本粘土学会秋季大会, 琉球大学 (沖縄)
- ⑨ 山田哲士・小口千明 (2007): 建設後約 40 年経過したコンクリート構造物の塩害に関する研究, 日本地理学会発表要旨集, no. 71, pp.132
- ⑩ Oguchi, C. T. and Yuasa, H. (2007): Effects of rock properties on salt weathering of Oya tuff building stone. European Geosciences Union 2007, Vienna (Austria), CD-rom.
- ⑪ 青木卓朗・高屋康彦・小口千明 (2007): モルタルの溶解に及ぼす海水の影響に関する実験的研究, 日本地球惑星科学連合 2007 年合同大会, 幕張メッセ (千葉), CD-rom.
- ⑫ 原子朋也・小口千明・高屋康彦 (2007): モルタルの溶解機構に関する実験的研究, 日本地形学連合 2007 年秋季大会, 筑波大学 (茨城) .
- ⑬ Oguchi, C.T. and Yuasa, H. (2006): Effect of rock properties on weathering of Oya-tuff, Transactions, Japanese Geomorphological Union, vol.27, pp. 500-501.
- ⑭ 山田哲士・小口千明 (2006): コンクリート構造物の塩類風化に関する研究. 地形, vol. 27, pp. 383
- ⑮ 湯浅勇人・小口千明 (2006): 大谷凝灰岩の塩類風化における岩石物性の影響について, 日本地理学会発表要旨集, no. 69, pp. 223.

6. 研究組織

(1) 研究代表者

小口 千明 (OGUCHI CHIAKI)

埼玉大学・地圏科学研究センター・准教授

研究者番号 : 20312803