

平成 30 年 6 月 16 日現在

機関番号：15501

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2015～2017

課題番号：15K13579

研究課題名(和文)花崗岩の化学的風化指数による岩盤崩壊可能性の評価法の確立

研究課題名(英文)Risk management of rock avalanche using index of chemical weathering

研究代表者

大和田 正明(Owada, Masaki)

山口大学・大学院創成科学研究科・教授

研究者番号：50213905

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,800,000円

研究成果の概要(和文)：野外での観察によって、新鮮から強風化した花崗岩の化学組成を測定し、CN(CaO+Na₂O)、A(Al₂O₃)、K(K₂O)(モル)を端成分とする三角図(CN-A-K図)を使って花崗岩の風化過程について検討した。その結果、風化の進行に伴いCNが減少するタイプ1、風化の初めにKが増加し、その後CNが減少するタイプ2、そして、初めにCNが減少し、最後にKが減少するタイプ3に区分された。土石流発生頻度の高い箇所では、タイプ2の化学的变化が卓越する。このことは、岩盤強度を劣化させる要因として、地下における熱水変質の影響が大きいことを示唆し、土石流発生の危険度を評価する際の指標となる可能性がある。

研究成果の概要(英文)：Some of chemical index are powerful tools for estimating degree of chemical weathering. I determined the chemical compositions from fresh to decomposed granitic rocks using CN (CaO+Na₂O), A(Al₂O₃), K(K₂O) diagram, and can classify these rocks into three types; Type 1 to Type 3 with increasing degree of weathering. Type 1 shows decreasing CN from fresh to decomposed rocks. Type 2 indicates increasing K at the beginning of weathering, then decreasing CN. A chemical trend of Type 3 are similar to that of Type 1 but it finally shows decreasing K. Type 2 is most dominant type of chemical weathering in the rock-avalanched fields. It suggests that the cause of decomposed granitic rocks is affected by hydrothermal alteration, and the chemical weathering of Type 2 could be a useful index for the risk of rock avalanche.

研究分野：地質学

キーワード：花崗岩体 化学的風化 化学的風化指標 土石流

1. 研究開始当初の背景

近年、毎年のように梅雨から台風シーズンにかけて豪雨による土砂災害(豪雨災害)が日本列島を襲っている。平成17年7月も福岡県で豪雨によって土石流が多発し、流域の住民や農地に甚大な被害を与えた。山口県でも平成10年に時間あたり200mmを超える降雨があり、防府市を中心に広範囲で土石流が多発した。そして中国地方における土石流発生現場の地質は、花崗岩が圧倒的に多い(石村ほか、1998)¹⁾。

(1) 土砂災害を引き起こす地質的背景

花崗岩は、ケイ素(Si)やアルカリ元素(Na, K)に富むマグマが地下で冷却・固結してできた岩石である。特に中国地方や北部九州には、1億年から8千万年前の白亜紀と呼ばれる地質時代に活動した花崗岩が広域に露出している。地下で固結した花崗岩が上昇する時、荷重圧が除かれるため体積膨張による割れ目が発達する。こうした作用が機械的な風化を促進し、同時に割れ目に浸透した水が鉱物と反応して化学的風化も進行する。花崗岩は一般に粗粒な岩石で上述した風化が進行しやすい。強風化した花崗岩は「真砂」と呼ばれ、手で簡単に握り潰すことができる。すなわち、こうした風化の進行に伴って物質的な強度も低下し、重力的に不安定な斜面や渓流では崩壊が起こりやすくなる。

(2) 花崗岩の変質と風化

花崗岩体は、しばしばマグマ由来の流体や熱せられた地下水と反応して熱水変質作用を起こし、特徴的な鉱物組み合わせを示す変質帯を形成する。熱水は主に断裂や岩脈を通路として移動するので、変質帯は限られた範囲に分布する。こうした変質帯は一般に粘土化を伴う岩盤劣化をもたらす。

風化作用は地表からの影響によって、その性質が時間とともに変化する現象で、物理的風化、化学的風化、鉱物学的風化、そして生物風化の4種類が知られている。実際の風化はこれらが複雑に組み合わせられている。花崗岩を構成する鉱物は、主に長石類(斜長石、カリ長石)、石英と黒雲母である。黒雲母の量比は10 vol%以下である。また、石英は風化に対して安定な鉱物なので、鉱物学的風化を考える場合は主に長石類が対象となる。長石類の風化による最終生成物は一般にカオリナイトなどの粘土鉱物である。

(3) 花崗岩の深層風化

花崗岩の風化は、しばしば地表から数10mの深さまでが進行していることがある。これを深層風化と呼ぶ。三浦(1993)²⁾は、山陰地方の事例研究を踏まえ、花崗岩の厚い風化帯の形成に関して以下を提案した。すなわち、マグマの固結最終段階で、火成活動に伴う断層破砕帯が生じ、それを充填する沸石脈が形成された。また、母岩側では、熱水との反応によって曹長石(Naに富む斜長石)や黒雲母から変質したパーミキュライトが晶出した。こうした変質帯は直ちに岩盤強度の低下

に直結するわけではないが、鉱物学的変化は岩石の物理・化学的性質に何らかの変化をもたらすはずで、変質帯の存在が深層風化の一因になった可能性があることを指摘した。

(4) 花崗岩の劣化に関する課題

中国地方では、白亜紀から古第三紀にかけての火成活動が活発であった。こうした火成活動に伴って地殻変動が起こり、断層破砕帯の形成や岩脈の形成など、物理的な破砕作用が生じた。そして、脆弱化した通路を利用して熱水が循環し、母岩との間に熱水変質作用を引き起こした。中国地方の地質は、火成活動によって生じた花崗岩や火山岩類によって占められている。すなわち、中国地方は、熱水と母岩の相互作用による変質帯が広範囲に形成された。変質作用が深層風化の一因であれば、変質帯が風化作用の形成や岩盤劣化の進行具合にどのような作用を及ぼしたのかを明らかにする必要がある。こうした、変質作用と風化作用の具体的な関連性を解明することが課題である。

2. 研究の目的

花崗岩地帯での土石流について地質情報と化学的指標から発生要因を解析する。花崗岩地帯の場合、化学的風化の進行が岩盤強度の劣化に大きな影響を与えている可能性が指摘されている。これまで花崗岩の化学的風化指数は多数提案されてきた(Fedo et al., 1995³⁾; Kamei et al., 2012⁴⁾; Nesbitt et al., 1997⁵⁾)。しかし、それらの指数は変質作用と風化作用による化学変化を区別していない。そこで本研究では、山口県防府花崗岩体を例に変質作用と風化作用による化学的変化を考慮し、岩盤崩壊の危険性を含んだ化学的風化指標を策定する。そして、土石流発生の危険性に関する評価指標を提案する。

3. 研究の方法

一般に花崗岩の化学的風化は斜長石の加水分解による粘土鉱物の形成で進行する。この時、斜長石からCaやNaが溶脱するため、化学的風化が進んだ岩石ほどこうした元素に乏しくなる。亀井は、マグマ期の化学組成変化を考慮した花崗岩の新たな化学的風化指数を提案した(Kamei et al., 2012⁴⁾)。しかし、この指数は化学的な風化度を明瞭に区分することは可能であるが、変質作用と風化作用は区分できない。そのため、岩盤崩壊にいたる化学的指標としては十分でない。そこで、変質作用の影響を顕微鏡観察によって推定し、その上で岩盤崩壊に至る風化作用に対して変質作用がどのような影響を及ぼすのかについて検討した。すなわち、従来報告されている花崗岩地帯の化学的風化指数に顕微鏡観察という岩石学的な検討を組み込み、岩盤崩壊の危険性を含む化学的風化指標を策定する。特に変質鉱物が岩盤崩壊に及ぼす影響を地質情報と共に評価する。

野外において変質粘土脈は目視できるが、

微小割れ目を浸透してきた熱水によって形成した粘土鉱物は見落とすことも多い。一方で、粘土脈を確認できない場合でも、粘土鉱物の生成が進めば、その組成を反映して化学組成も変化する。すなわち、薄片観察によって粘土鉱物を検出できれば、変質作用の影響を検討でき、岩盤崩壊に至る化学的風化度の指標の策定が可能となる。

4. 研究成果

防府花崗岩の大部分は同程度にマサ化している。それにもかかわらず土石流の発生箇所は特に右田ヶ岳付近に集中する(図1)。本研究では、図1の分布に基づいて、右田ヶ岳周辺の崩壊密集地域とその北側の崩壊頻度の比較的少ない地域から試料を採集した。試料は一露頭から比較的新鮮な花崗岩(以下、花崗岩)、風化花崗岩(以下、風化岩)そして強風化花崗岩(真砂)(以下、強風化岩)を採集し、薄片観察による岩石記載的特徴の把握、それに加えて鉱物を同定するため電子線マイクロアナライザー(EPMA)によって化学的特徴の把握につとめた。そして蛍光X線分析装置(XRF)を使って、花崗岩、風化岩および強風化岩の全岩化学組成を分析した。

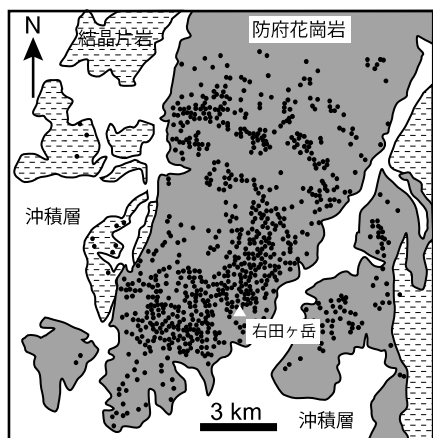


図1. 防府花崗岩体周辺の地質と平成21年土砂災害発生時の崩壊地点(北村, 2010). 黒丸の点が崩壊地。崩壊地の大部分は防府花崗岩体内部にある。

(1) 薄片観察による記載的特徴

花崗岩は、肉眼で淡い灰色を示し、ハンマーで叩くと金属音を発する。顕微鏡下では、斜長石、石英、カリ長石および黒雲母から構成され、少量のジルコン、燐灰石そして不透明鉱物を含む。斜長石の内部には、しばしば高次の干渉色を示す微細結晶が晶出している程度で、顕著な変質鉱物は認められない。

それに対して、風化岩や強風化岩では、肉眼で褐色味を帯び、ハンマーで叩くと鈍い音を発するか、音もなく脆く崩れていく。顕微鏡による観察では、花崗岩と異なり、風化岩では鉱物内部や鉱物の粒界をまたぐ微細な割れ目が顕著に発達する。また、大部分の斜長石は、内部が高次の干渉色を示す微細結晶によって置換されている。カリ長石は、一般

にパーサイト構造が発達するが、オープンニコルで観察すると結晶全体が濁った色を示す。黒雲母は結晶の周囲やへき開にそって緑泥石化している。また、結晶全体が緑泥石化している試料もある。強風化岩は、あらかじめ樹脂で固めてから薄片を作成した。そのため、結晶内部や粒間には、樹脂が充填されている。このことは、微細な割れ目の頻度が風化岩に比べ増えたことと、開口幅が風化岩より広がっていることを示す。長石類は全体に濁った色を示す。斜長石は風化岩で見られたようなクロスニコルで高次の干渉色を示す微細結晶は目立たなくなり、全体に暗灰色味を帯びようになる。また、一部のカリ長石はパーサイト構造が風化岩に比べてはっきりしなくなる。こうした、斜長石とカリ長石の特徴は粘土鉱物による置換が進行していることを示唆する。また、黒雲母は全体が暗褐色味を帯びようになり、パーミキュライト化がより進行していることを示す。

(2) 鉱物化学組成の特徴

風化岩や強風化岩の斜長石に見られる微細な結晶を同定するため、EPMAで化学組成を分析した。その結果、高次の干渉色を示す微細結晶が分布する領域はカリウム(K)に富むことが明らかとなった。こうした化学的特徴と顕微鏡観察の結果から、微細な結晶はセリサイトであると考えられる。また、同時にカルシウム(Ca)に富む結晶も稀に存在した。顕微鏡での特徴を考慮すると、この結晶は緑

(3) 全岩化学組成の特徴

風化度の違いがどのように全岩化学組成の変化に影響するのかわかるために、同じ露頭から風化度の異なる試料を採取して分析した。分析データはすでに報告されている化学的風化指数を使って解析した。その結果、花崗岩、風化岩そして強風化岩と進むにつれて、化学的風化指数は変化し、化学的風化が進行していることを示した。強風化岩は風化岩に比べると化学的風化指数の示す風化度が明らかに大きい。野外での観察においても強風化岩は非常に脆く、強度は著しく劣る。一方、花崗岩から風化岩にかけての化学的風化指数の変化を細かくみると、場所によって変化傾向が異なっていた。すなわち、右田ヶ岳の周辺では、他地域に比べて化学的風化指数による風化度がやや高い傾向にあった。そして、このような傾向にある試料は、斜長石結晶の内部が高頻度でセリサイトに置換されている。セリサイトは熱水による変質作用で形成されるため、こうした風化度の違いは、変質作用を受けた程度の違いを反映している可能性がある。既述のように、斜長石がセリサイトに置換されるためにはカリウムの挙動が重要である。そこで、カリウムの挙動に着目して、風化岩が経験した熱水による変質作用と地表での風化作用の影響を以下の方法で検討した。

(4) 変質作用と風化作用の影響

花崗岩から強風化岩に至る過程で岩石が受けた変質作用と風化作用の過程を明らかにするため、CN(CaO+Na₂O), A(Al₂O₃), K(K₂O) (モル) を端成分とした三角図(CN-A-K 図)で検討した。その結果、風化の程度に応じて以下3タイプの変化傾向が認められた。

タイプ1: 風化の進行と共にCNが減少する

タイプ2: 最初Kが増加し、次にCNが減少する

タイプ3: 最初CNが減少し、最後にKが減少する

このようなパターンと試料の分布や顕微鏡観察の結果から以下のような変質作用と風化作用の関係が考えられる。

A. タイプ1では、比較的新鮮な花崗岩と風化岩は同じ鉱物組み合わせを示すが、風化岩はクラック密度が増加する。タイプ2(はじめにKが増加)の斜長石はセリサイトが著しい。すなわち、熱水変質作用によってセリサイトが形成された。タイプ3の花崗岩と風化岩は顕微鏡で観察する限りタイプ1と同じである。しかし、強風化岩でKが減少することから、恐らく、強風化岩に至る過程でカオリン化が進行したと考えられる。

B. 土石流頻度の高い右田ヶ岳周辺では、タイプ2を示す化学的な変化が他のタイプよりも卓越する。

カリウムの挙動に着目した結果、右田ヶ岳周辺がもっとも顕著に熱水変質作用の影響を受けていた可能性が高い。重力異常と帯磁率データから、地下から防府花崗岩体へマグマを供給した箇所は岩体の南西部、右田ヶ岳周辺地域とされている(今岡ほか, 2012⁶⁾)。一般にマグマの供給源では、岩体の冷却後も熱水循環が起こりやすいとされている。こうした熱水変質作用は地下で起こるが、三浦(1993)²⁾が指摘したように、変質作用が花崗岩の深層風化につながれば、地表での風化作用によって岩盤はさらに脆くなり、結果として土石流の発生頻度が高くなると予想される。すなわち、花崗岩地域において、地表部における風化作用の前に地下で起こった変質作用の影響は土石流の危険性を考慮する上で評価すべき重要な項目であると推察される。

引用文献

- 1) 石村和寿、堀田政則、北村晴夫、1998、山口県における土砂災害と地質、第50回土木学会中国支部研究発表会概要集、371-372。
 - 2) 三浦 清、1993、わが教育と研究の軌跡 - 島根大学 27 年をふりかえって -、三浦清教授退官記念事業会、447-457。
 - 3) Fedo, C.M., Nesbitt, H.W., Young, G.M., 1995, Unraveling the effects of potassium metasomatism in sedimentary rocks and paleosols, with implications for paleoweathering conditions and provenance. *Geology*, 23, 921-924.
 - 4) Kamei, A., Fukushi K., Takagi, T., Tsukamoto, H., 2012, Chemical overprinting of magmatism by weathering: A practical method for evaluating the degree of chemical weathering of granitoids. *Applied Geochemistry*, 27, 796-805.
 - 5) Nesbitt, H.W., Markovics, G., 1997, Weathering of granodioritic crust, long-term storage of elements in weathering profiles, and petrogenesis of siliciclastic sediments. *Geochimica Cosmochimica Acta*, 61, 1653-1670.
 - 6) 今岡照喜、小室裕明、山脇恵理香、金折裕司、大川侑里、金田孝典、山本明彦、2012、山口県後期白亜紀防府バソリスの三次元形態：地質・岩石と重力異常からの推定、地質学雑誌、118、782-800。
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) 深見 潤、大和田正明、2017、福岡県、三郡山東麓に分布する苦鉄質変成岩類の全岩化学組成、地質学雑誌、123、1055-1060 (査読付)
 - 2) Tsukada, K., Yuhara, M., Owada, M., Shimura, T., Kamei, A., Kouchi, Y., Yamamoto, K., 2017, A low-angle brittle shear zone in the western Sør Rondane Mountains, Dronning Maud Land, East Antarctica: Implications for assembly of Gondwanaland. *Journal of Geodynamics*, 111, 15-30 (査読付)
 - 3) 寺林 優、山本啓司、亀井淳志、2017、岩国-柳井地域の領家帯、地質学雑誌、123、559-612 (査読付)
 - 4) Watanabe, Y., Kon, Y., Echigo, T., Kamei, A., 2017, Differential fractionation of Rare Earth Elements in oxidized and reduced granitic rocks: Implications for Heavy Rare Earth enriched Ion adsorption mineralization. *Resource Geology*, 67, 35-52 (査読付)
 - 5) Imaoka, T., Kawabata, H., Nagashima, M., Nakashima, K., Kamei, A., Yagi, K., Itaya, T., Kiji, M., 2017, Petrogenesis of Early Cretaceous lamprophyre dike from Kyoto Prefecture, Japan: Implications for the generation of high-Nb basalt magmas in subduction zones. *Lithos*, 290-291, 18-33

(査読付)

6) Owada, M., Osanai, Y., Nakano, N., Adachi, T., Kitano, I., Tran Van Tri, Kagami, H., 2016, Late Permian plume-related magmatism and tectonothermal events in the Kontum Massif, central Vietnam. Journal of Mineralogical and Petrological Sciences, 111, 181-195 (査読付)

7) Kamei, A., 2016, Determination of trace element abundances in GSJ reference rock samples using lithium metabolite – lithium tetraborate fused soluteons and inductively coupled plasma mass spectrometry. Geoscience Report of Shimane University, 34, 41-49 (査読付)

8) Akasaki, E., Owada, M., Kamei, A., 2015, Crustal differentiation due to partial melting of granitic rocks in an active continental margin, the Ryoke Belt, Southwest Japan. Lithos, 230, 82-91(査読付)

9) Wang, F., Wu, Y.H., Yang, H., Tanla, Y., Kamei, A., 2015, Quick report of investing on the 2014. 8. 20 debris flows triggered by a concentrated downpour of heavy rainfall in Hiroshima City, Japan. Geoenvironmental Disasters, 2, 15-25(査読付)

10) 亀井淳志、内藤一樹、高村早弥香、加々島慎一、奥澤康一、関陽児、渡部芳夫、2015、新潟-山形県境の金丸-小国地域に産するHFS元素に富むザクロ石両雲母花崗岩、岩石鉱物科学、44、131-154 (査読付)

[学会発表](計8件)

1) 池田啓貴、大和田正明、2018、防府花崗岩に発達する二次鉱物の記載的特徴、日本地質学会西日本支部総会・例会、広島県東広島市

2) Owada, M., Kawasaki, T., Kamei, A., 2017, Origin of felsic middle crust: Evidence from experimental study for Cretaceous I-type granodiorite in Kyushu, SW Japan. 日本地球惑星科学連合 2017 年大会 (国際学会)、千葉県、千葉市

3) 大和田正明、亀井淳志、川寄智佑、2017、白亜紀火山弧地殻の組成分化：九州の例、日本鉱物科学会 2017 年年会、愛媛県、松山市

4) 亀井淳志、山本奈穂、早坂康隆、今岡照喜、2017、山陰帯隠岐の島の島後南谷花崗岩の成

因と位置づけ、日本鉱物科学会 2017 年年会、愛媛県、松山市

5) 岡澤 誠、亀井淳志、2017、鳥取県金持地域に産する深成岩類の地質および岩石学的研究、日本鉱物科学会 2017 年年会、愛媛県、松山市

6) Watanabe, Y., Kon, Y., Echigo, T., Kamei, A., 2016, Differential fractionation of rare earth elements in reduced and oxidized granitic rocks. The International Conference on Rare Earths, Rare Earth Society of Japan (国際学会)、北海道、札幌市

7) 大和田正明、浦島遼平、江島圭祐、松田洋一、池田慎一郎、亀井淳志、2015、北部九州、白亜紀 I-タイプ花崗閃緑岩のマグマ過程、日本地質学会、長野県、長野市

8) Zou, S., Li, Z., Kamei, A., Geochronology, geochemistry and petrology of Bashisuogong intrusions: Implications for magmatic evolution of Tarim LIP. 日本地球惑星科学連合 2015 年大会 (国際学会)、千葉県、千葉市

[図書](計1件)

1) 大和田正明 他 (分担執筆)、三省堂、宝石の科学、印刷中

[産業財産権]

出願状況 (計0件)

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
出願年月日：
国内外の別：

取得状況 (計0件)

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
取得年月日：
国内外の別：

[その他]

ホームページ等：特になし

6. 研究組織

(1) 研究代表者

大和田 正明 (OWADA, Masaaki)

山口大学・大学院創成科学研究科・教授

研究者番号：50213905

(2)研究分担者

亀井 淳志 (KAMEI, Atsushi)
島根大学・大学院総合理工学研究科・教授
研究者番号：6039691

(3)連携研究者

()

研究者番号：

(4)研究協力者

()