

氏名	佐藤 昌人		
学位の種類	博士（理学）		
学位記番号	博 甲 第 9028 号		
学位授与年月日	平成 31年 3月 25 日		
学位授与の要件	学位規則第4条第1項該当		
審査研究科	生命環境科学研究科		
学位論文題目	Salt Weathering in Humidity-Change or Freeze-Thaw Environments: A Series of Laboratory Experiments (湿度変化もしくは凍結融解により生じる塩類風化に関する室内実験)		
主査	筑波大学准教授	博士（理学）	八反地 剛
副査	筑波大学教授	理学博士	松岡 憲知
副査	筑波大学准教授	博士（理学）	池田 敦
副査	埼玉大学准教授	博士（理学）	小口 千明

論 文 の 要 旨

本論文において、著者は石造建造物や海岸付近の岩石にしばしば発生する塩類風化現象について、室内実験のアプローチから取り組んでいる。第1章では、従来の研究の問題点を指摘し、本論文の意義について議論している。従来の室内実験では、岩石の供試体に飽和塩溶液や蒸留水を浸潤させたのちに高温で乾燥させることを繰り返す設定が主に採用されていた。このような条件では、硫酸ナトリウムが強い破壊力を持つ一方で、海水の主成分である塩化ナトリウムはあまり風化を進めないことが指摘されていた。一方で、著者は、湿度変化が生じる条件での風化実験や、高濃度の塩溶液の凍結融解による風化実験が行われていないことを指摘し、異なる塩類の破壊力を比べるために、そうした実験を行う意義を記載している。

第2章には実験方法が記載されている。著者は湿度変化による塩類風化実験（以下、湿度実験）と、凍結融解を伴う塩類風化実験（以下、凍結実験）の2種類の実験を実施した。湿度実験では、5種類の岩石（凝灰岩、砂岩2種類、泥岩2種類）と3種類の塩（塩化ナトリウム、硫酸ナトリウム、硫酸マグネシウム）を使用した。湿度実験では試料を塩溶液に浸した後、1回だけ炉乾燥させて、その後温度を10°Cまたは20°Cに保った状態で、6時間周期にて湿度を20~90%RHの範囲で変化させた。実験中、岩石試料に対する水分の供給源は庫内空気中の水分のみに限定されている。凍結実験には、4種類の岩石（安山岩、凝灰岩2種類、砂岩）と3種類の塩（塩化ナトリウム、硫酸ナトリウム、硫酸マグネシウム）を使用した。凍結実験では、塩溶液で飽和させた試料をアルミ箔で覆い、24時間周期にて温度を-30~10°Cの範囲内で変化させた。いずれの実験でも定期的に試料の重量、表面硬度などを測定した。また比較対象として蒸留水に浸した試料を用いた実験も実施した。

第3章において、著者は湿度実験と凍結実験の結果を記載し、第4章では各実験条件における風化プロセスと、それらの風化が生じうる野外の環境条件との関連について考察している。湿度実験では、塩化ナトリウムが2つの硫酸塩よりも著しい風化を引き起こすことを明らかにした。特に塩化ナトリウムを含む砂岩試料の一部は、100サイクルの湿度変化の後、完全に破壊された。他の岩石試料も、試料表面の膨張、岩片の剥離、試料の表面強度の低下が、他の塩に比べて明瞭であることを示している。硫酸マグネシウムを含む試料では、一部に重量減少が発生しただけであり、硫酸ナトリウムを含む試料では表面に多量の塩が析出したただけであった。硫酸塩による風化が抑制された理由について、著者は硫酸マグ

ネシウムの水和反応速度が遅いこと、硫酸ナトリウムの水和による体積膨張がさらなる水分浸透を阻害した可能性をそれぞれ指摘している。一方、塩化ナトリウムは80%RH以上で潮解性を示すため、湿度変化サイクルにおいて潮解と析出を繰り返した結果、試料の風化が促進されたことを推定している。

凍結実験では、塩の種類によらず塩溶液で飽和させた試料が、蒸留水で飽和させた試料に比べて、著しく風化することを示した。特に硫酸マグネシウムを浸潤させた試料は、他の塩を含む試料に比べて風化が顕著であった。過去の研究では、凍結融解環境において硫酸マグネシウム溶液による風化は限定的であることが指摘されていた。著者は、本研究と既存研究の実験条件の違いを指摘し、高濃度の塩溶液を用いた場合には顕著な風化が生じることを指摘している。また、凍結実験における各種の風化速度と塩類風化指標WSIとの相関が高いことを示した。これらの結果に基づき、十分な量の塩が存在する環境で凍結が発生する場合には、塩類の析出により風化が促進されている可能性を指摘している。

第5章では、2つの実験によって得られた成果がまとめられている。湿度変化サイクルを受ける野外環境下において、塩化ナトリウムは潮解と析出を繰り返し、強力な風化を引き起こす。凍結融解が生じる環境では、高濃度の塩溶液が存在する場合に風化が促進される。これらの点から著者は、特に海水飛沫の影響を受ける沿岸域、あるいは高濃度の塩が凍結する野外環境における塩類風化の重要性を指摘している。

審 査 の 要 旨

塩類風化に関する実験的研究は数多く行われているものの、実際に野外で生じうるような湿度変化環境、あるいは凍結融解環境を想定した塩類風化実験は、設定の難しさなどの制約もあり、あまり行われてこなかった。本論文では、湿度変化環境や凍結融解環境を再現し、岩石の塩類風化に関する膨大なデータを取得することに成功している。この点は本論文のオリジナリティとして評価できる。

本論文の特筆すべき成果の1つは、高湿度と低湿度を繰り返す環境において、塩化ナトリウムが著しい塩類風化を引き起こすという事実を実験的に証明したことである。従来の塩類風化に関する研究では、硫酸塩類が塩化ナトリウムよりも強力な塩であると考えられてきた。著者は、乾燥した岩石表面が湿度変化のみにさらされる条件では、塩化ナトリウムが最も効果的な塩になることを示した。さらに、なぜそのような環境下で塩化ナトリウムが効果的な塩になるかという問いについて、潮解や水和の発生条件に基づき検討した。また、凍結融解環境を再現した実験においても、従来の知見とは異なり、硫酸マグネシウムが効果的な塩になりうることを示した。これらの一連の研究成果は、海岸や寒冷地の野外にみられるタフォニの形成メカニズム、あるいは湿度変化を受ける環境にある石造建造物の風化などの問題に対して大きく貢献すると考えられる。特に海岸周辺域では、塩類風化が従来考えられていたよりもはるかに広域かつ効果的にはたらくことを示唆しており、岩石風化の認識を変えうる重要な知見である。これらの点は博士論文として高く評価されるものである。

平成31年1月24日、学位論文審査委員会において、審査委員全員出席のもと論文の審査および最終試験を行い、本論文について著者に説明を求め、関連事項について質疑応答を行った。その結果、審査委員全員によって合格と判定された。

よって、著者は博士（理学）の学位を受けるに十分な資格を有するものとして認める。