

平成 22 年 5 月 25 日現在

研究種目：基盤研究（B）

研究期間：2007～2009

課題番号：19300305

研究課題名（和文）石灰岩の風化・削剥速度とカルスト地形の形成プロセス

研究課題名（英文）WEATHERING AND DENUDATION RATES OF LIMESTONES AND FORMATIVE PROCESSES OF KARST LANDFORMS

研究代表者

松倉 公憲（MATSUKURA YUKINORI）

筑波大学・大学院生命環境科学研究科・教授

研究者番号：80107341

研究成果の概要（和文）：カルサイトに生成される原位置宇宙線生成放射性核種の  $^{36}\text{Cl}$  を用い、石灰岩の長期にわたる削剥速度を見積もることを目的とした。日本各地の亜寒帯から温帯の 7 つのカルスト地域において、ピナクル頂部から 5 cm 深部までの岩石試料を採取した。 $^{35}\text{Cl}$  のキャリアを加えた加速器質量分析によりカルサイト中の  $^{36}\text{Cl}$  濃度を計測した。得られた核種濃度は  $10^5$ – $10^6$  atom  $\text{g}^{-1}$  であり、カルスト表面は 10 万年以上にわたり物理的・化学的プロセスをうけて削剥されてきたことを示した。削剥速度は 20–60 mm  $\text{kyr}^{-1}$  と見積もられ、中央日本で最小になった。この傾向は、削剥には化学的溶食と物理的風化（凍結破砕）の両方のプロセスが関与しており、各地域の平均気温、降水量、凍結—融解日数などの要因が重要であることを示唆している。

研究成果の概要（英文）：This study attempted to quantify long-term subaerial denudation of bare carbonate rock surfaces by using in situ-produced cosmogenic  $^{36}\text{Cl}$  in calcite. Carbonate samples were collected from the topmost 5 cm of exposed pinnacles at several non-glaciated karst areas in subtropical to subarctic regions in Japan. Concentrations of natural Cl and  $^{36}\text{Cl}$  in calcite were determined by accelerator mass spectrometry with isotope dilution with  $^{35}\text{Cl}$ -enriched carrier spike. The nuclide concentrations were of the order of  $10^5$ – $10^6$  atom  $\text{g}^{-1}$ , and converted to total denudation rates averaged over a  $10^5$  yr-timescale of chemical and physical processes acting on the karst surfaces. The denudation rates were 20–60 mm  $\text{kyr}^{-1}$ , being lowest in the central part of Japan. This tendency indicates the alternation of relative importance of chemical (dissolution) and physical (frost shattering) processes in denudation, depending on site-specific factors such as mean temperature, annual precipitation, and freeze–thawing intensity.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2007 年度	5,400,000	1,620,000	7,020,000
2008 年度	4,200,000	1,260,000	5,460,000
2009 年度	1,800,000	540,000	2,340,000
年度			
年度			
総計	11,400,000	3,420,000	14,820,000

研究分野：複合領域

科研費の分科・細目：地理学・地理学

キーワード：地形，風化

### 1. 研究開始当初の背景

(1)石灰岩の風化（溶解）速度，あるいはカルスト地形の削剥速度が，他の岩型に比較して格段に大きいことは認識はされていても，具体的な速度に関するデータは極めて少なかった。

(2)石灰岩の風化(溶解)速度あるいはカルスト地形の削剥速度が気候に依存するのか，石灰岩の岩質に依存するのかは不明であった。

(3)喜界島の隆起波食棚上に，巨礫が載っており，その巨礫の下部がペDESTAL（台座岩）になっていることを発見し，その台座岩の高さから，波食棚を構成する琉球石灰岩の溶解速度を 300-400 mm/ky と見積もった。

### 2. 研究の目的

上記1の背景をもとに，石灰岩とそれがつくるカルスト地形の形成プロセスとその速度を明らかにしようとするものである。

### 3. 研究の方法

カルスト地形に限らず，一般的に「侵食地形」にアプローチすることは，従来ほとんどできなかった。なぜなら侵食地形は，侵食された物質が除去されてしまい，分析対象物質が残っていないからであった。しかし本研究では，そのような侵食地形の年代を特定することができる画期的な方法を援用する。すなわち最近，侵食・削剥地形の形成年代や侵食速度を知る方法として注目を浴びている「宇宙線生成放射性核種（Terrestrial *in situ* Cosmogenic Nuclides）の表面照射年代測定法：以下，TCN法と略称する」を用いることにする。このTCN法の原理は，1)宇宙線が岩盤表面に照射することにより，核種を生成させ蓄積させる，2)核種の生成速度は，地球上のどの場所（緯度・経度・高度）にあるかで異なるが，同じ場所では時間的に変化しない，3)したがって核種濃度は時間とともに大きくなる，4)一方核種はそれぞれの半減期をもって濃度が減少する，5)上記の3)と4)から，岩盤表面の鉱物粒子に蓄積された核種の濃度を計測することにより，岩盤表面が地表に露出してから現在までの時間＝その侵食地形の形成時間）を見積もることができる，というものである。

### 4. 研究成果

(1)石垣島において，年代が既知の津波石を

利用することにより，その下部に発達する石灰岩からなる台座岩の形成条件を吟味した。その結果，①台座岩が形成される条件として，津波石の打ち上げ時に地表が土壌に覆われていないことが重要であること，②台座岩の形成速度は，基盤が石灰質砂岩であるときよりも，純粋な石灰岩である場合のほうが大きい，ことがわかった。

(2)石灰岩タブレットを石灰岩流域と花崗閃緑岩流域に埋設し，両者の溶食速度の差異を検討した。その結果，pHと電気伝導度の低い花崗閃緑岩流域に埋設したタブレットのほうが，石灰岩流域に埋設したものよりも9倍も溶解速度が大きいことがわかった。このことは，石灰岩タブレットの溶解速度は，設置地点の水質条件に大きく依存していることが示唆された。

(3)種々の気候環境において多様なカルスト地形を形成する石灰岩の溶解速度を調べるため，秋吉台（山口県），平尾台（福岡県），辺戸岳および山里（沖縄県）の各地で石灰岩ピナクルの頂部岩石を採取し，山里の試料において小さく，秋吉台および平尾台のおよそ半分の値であった。このことは，沖縄において石灰岩表面の溶食速度は約2倍大きいことを示唆している。この研究により，石灰岩の気候依存性を定量化するための糸口が得られた。

(4)種々の気候環境におけるリレンカレンの研究史をまとめた。その結果，地形学的形態に関する研究はいくつか存在するが，リレンカレンの形成プロセスや形成メカニズム，形成速度に関する研究はほとんどないことがわかった。

(5)以前行った喜界島の調査結果を，新しい資料を用いて再検討した。すなわち，年代が既知の津波石を利用することにより，その下部に達する石灰岩からなる台座岩の形成速度を再吟味した。その結果，台座岩の形成速度（周辺地表面の低下速度）は，以前報告した速度（205 mm/ky）より6%大きい218 mm/kyであることがわかった。

(6)上記と同じ喜界島の台座岩とその上

に載る巨礫のいくつかについて、それらの<sup>14</sup>C年代測定を行った。その結果、台座岩の年代値は、周辺の完新世段丘の離水時期とほぼ同時期であった。また、台座岩の上に載る巨礫については、津波石の可能性のあるのは一個だけであり、多くの巨礫は背後の崖から供給されたものではないかと考えられた。

(7)<sup>36</sup>Clの宇宙線生成放射性核種を用いた年代法を用い、日本各地のカルスト地域に形成されているピナクルの溶解速度について検討した。その結果、ピナクルの溶解速度は雨量とは明瞭な相関は認められず、北海道と沖縄で大きく、本州で小さいことが分かった。このことから、基本的には気温の高いほど化学的溶解が進むものの、一方、北海道のような寒冷地では、化学的溶解が小さく、そのほかに凍結破砕（物理的風化）の影響を受けていることが予想された。

#### 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 Kogure, T. and Matsukura, Y., Critical notch depths for failure of coastal limestone cliffs: Case study at Kuro-shima, Okinawa, Japan. *Earth Surface Processes and Landforms*, 査読有, 2010,
- ② Matsushi, Y., Sasa, K., Takahashi, T., Sueki, K., Nagashima, Y. and Matsukura, Y., Denudation rates of carbonate pinnacles in Japanese karst areas: estimates from cosmogenic <sup>36</sup>Cl in calcite, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B*, 査読有, 268 巻, Issues 7-8, 2010, 1205-1208
- ③ 若狭 幸, 前門 晃, 青木 久, 小暮哲也, 松崎浩之, 松倉公憲, 喜界島の台座岩に載る巨礫の <sup>14</sup>C年代, 筑波大学陸域環境研究センター報告, 査読無, 10 号, 2009, 69-74.
- ④ 早川裕一, 青木 久, 藤永 豪, 前門 晃, 松倉公憲, 澁澤写真を用いた喜界島における台座岩の高さの推定: 石灰岩地表面の溶解による低下速度の再検討, 地形, 査読有, 30 巻, 2009, 227-231.
- ⑤ 青木 久, 松倉公憲, 完新世サンゴ段丘の地表面高度と旧汀線高度との関係, 大東文化大学紀要, 査読無, 4 号, 2009, 1-7.

- ⑥ Hattannji, T., Yamamoto, M, Matsukura, Y., Dissolution rates of limestone tablets in a flow-through system: a laboratory experiment, *Tsukuba Environmental Science*, 査読無, 4 巻, 2008, 3-7.
- ⑦ 松倉公憲, リレンカレンの形状とそれを規定する要因: 研究のレビューと今後の課題, 筑波大学陸域環境研究センター報告, 査読無, 9 号, 2008, 3-14.
- ⑧ 青木 久, 松倉公憲ほか3名, 石垣島における台座岩の形成条件と形成速度, 筑波大学陸域環境研究センター報告, 査読無, 8 号, 2007, 35-40.
- ⑨ 八反地 剛, 松倉公憲, 石灰岩タブレットを用いた野外風化実験: 水質が風化速度に与える影響, 筑波大学陸域環境研究センター報告, 査読無, 8 号, 2007, 41-47.
- ⑩ 松四雄騎, 若狭 幸, 松崎浩之, 松倉公憲, 宇宙線生成核種 <sup>10</sup>Be および <sup>26</sup>Al のプロセス地形学的応用, 査読有, 地形, 28 巻, 2007, 87-107.

[学会発表] (計 7 件)

- ① 松四雄騎, 笹 公和, 松崎浩之, 松倉公憲, カルスト地形研究における宇宙線生成核種の応用, 日本地球惑星科学連合 2010 年大会, 2010 年 5 月 24 日, 幕張メッセ
- ② 松四雄騎, 笹 公和, 末木啓介, 松倉公憲ほか, 日本列島におけるカルスト地形表面の削剥速度: 宇宙線生成核種 Cl-36 による推定, 日本地球惑星科学連合 2009 年大会, 2009 年 5 月 19 日, 幕張メッセ
- ③ 八反地 剛, 松倉公憲, 渓流水の水質が石灰岩タブレットの風化速度に与える影響, 日本地球惑星科学連合 2008 年大会, 2008 年 5 月 28 日, 幕張メッセ
- ④ 松四雄騎, 森口有里, 松崎浩之, 松倉公憲ほか, Formation age and denudation rate of the Akiyoshi Karst: and approach from cosmogenic nuclides in relict fluvial sediments, 日本地球惑星科学連合 2008 年大会, 2008 年 5 月 28 日, 幕張メッセ
- ⑤ 松四雄騎, 笹 公和, 高橋 努, 長島泰夫, 松倉公憲, In situ <sup>36</sup>Clを用いた石灰岩ピナクルの溶食速度推定, 日本地形学連合, 2007 年 11 月 10 日, 筑波大学
- ⑥ 森口有里, 松四雄騎, 松崎浩之, 松倉公憲, 秋吉台カルストの成立年代と台地面の削剥速度, 日本地形学連合, 2007 年 11 月 10 日, 筑波大学
- ⑦ 小暮哲也, 松倉公憲, ノッチおよび垂直節理が発達したサンゴ礁石灰岩崖における重力性および波浪性崩壊, 日本地形学連合, 2007 年 11 月 10 日, 筑波大学

[図書] (計1件)

- ① 松倉公憲, 朝倉書店, 地形変化の科学:  
風化と侵食, 2008, 242

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

松倉 公憲 (MATSUKURA YUKINORI)  
筑波大学・大学院生命環境科学研究科・教授  
研究者番号: 80107341

### (2) 研究分担者

松崎 浩之 (MATSUZAKI HIROYUKI)  
東京大学・大学院工学研究科・准教授  
研究者番号: 60313194  
八反地 剛 (HATTANJI TSUYOSHI)  
筑波大学・大学院生命環境科学研究科・講師  
研究者番号: 00418625  
青木 久 (AOKI HISASHI)  
大東文化大学・経営学部・講師  
研究者番号: 30423742