

令和 6 年 6 月 21 日現在

機関番号：18001

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2019～2023

課題番号：19K01160

研究課題名(和文) 南西諸島におけるカルスト地形の形成プロセス：野外計測と野外実験からのアプローチ

研究課題名(英文) Formation Processes of Karst Landforms in the Nansei Islands: An Approach from Field Measurements and Field Experiments

研究代表者

羽田 麻美 (Hada, Asami)

琉球大学・国際地域創造学部・准教授

研究者番号：70508746

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,400,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では亜熱帯島嶼にある沖縄島のカルストを対象に、熱帯型カルストの地形的特徴や形成プロセスについて、野外計測と野外実験の手法を用いて調査を進めた。円錐カルストでは、溶食凹地であるコックピット中央部に厚い土層が生成され、地上と土層の溶食速度の差は3～10倍であり、土壌の含水比が高いほど溶食が効果的に進む。断層沿いの石灰岩堤では、崖表面の岩石強度が高く、ケースハードニング(表面硬化作用)が生じており、そのことが溶食に対する抵抗性を大きくし、堤防状の地形を形成させる。

研究成果の学術的意義や社会的意義

熱帯・亜熱帯におけるカルスト地形研究は、分布や形状の特徴を述べた定性的な記載に留まっており、その形成プロセスは未解明な点が多い。本研究において、熱帯～亜熱帯に分布する凸型カルストの形成について、石灰岩の溶食速度の大きさや地形の内部構造(風化層の厚さ)、石灰岩表層でのケースハードニングの実態把握をおこない、従来ない、実測による定量的アプローチにより解明を試みた点に学術的意義がある。

研究成果の概要(英文)：The purpose of this study is to clarify geomorphic processes in a subtropical karst on Okinawa Island using field measurements and field experiments. Penetration tests showed that a soil layer of more than 3 m was formed in the middle of the cockpit, and the shape of the basement was ship-bottom shaped. The solution rates, as determined by the percentage weight loss of limestone tablets, were 3 to 10 times faster in the soil than in the air, and the higher the water contents of the soil, the faster the solution rates. Rock strength results from Schmidt rock hammer test on limestone walls along faults indicate that the strength at the surface of the fault cliff is higher than the internal strength. Case-hardening at the surface of the fault cliff increases the resistance to erosion and causes the formation of limestone walls.

研究分野：地形学

キーワード：円錐カルスト コックピット 石灰岩堤 野外実験 溶食速度 岩石強度 ケースハードニング 亜熱帯島嶼

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属します。

様式 C - 19、F - 19 - 1 (共通)

1. 研究開始当初の背景

石灰岩で構成されるカルスト地形は世界の陸地面積の約 13 %を占めており、冷帯から熱帯まで広く分布する。世界のカルスト地形では一般に、湿潤熱帯ではタワーカルスト・円錐カルスト・石灰岩堤などの起伏の大きい凸地形(熱帯型カルストと呼ぶ)が、湿潤温帯ではドリーネなどの凹地形が卓越する地形(温帯型カルストと呼ぶ)が形成されると考えられている。これら地形形成に關与する要因として、岩質や地質構造、地殻変動などの複数の要因が挙げられる。しかしながら、ある気候条件下において特徴的な地形が形成されている点に着目すると、その地域の降水量や気温などの気候条件が溶食量や速度に与える影響は少なくない。

日本の石灰岩は国土面積の 1 %未満の、僅かに分布するのみであるが、沖縄県には県面積の約 30 %に石灰岩が広がる。地質は中・古生層の緻密で硬い石灰岩から、琉球石灰岩とよばれる第四紀の固結度が低く隙間の大きい石灰岩まで、岩質の異なる数種の石灰岩が分布する。これらの石灰岩が作る地形として、沖縄県では本州域には存在しない円錐カルストや石灰岩堤が点在し、世界的にみると凸状を示す熱帯型カルストの北限域にあると考えられる。これら熱帯・亜熱帯におけるカルスト地形研究は、分布や形状的特徴を述べた定性的な記載に留まっており、その形成プロセスは未知な部分が多い。このことを背景に、本研究では次に述べる研究目的を設定した。

2. 研究の目的

熱帯型カルストの北限を示す亜熱帯地域のカルスト地形は世界的にも限られており、南西諸島のカルスト地形学的価値は高い。温帯型カルストと、熱帯型カルストの形態がなぜ異なるのかを地形プロセス学的に明らかにすることが最終的な目的であるが、本研究ではその第一歩として、亜熱帯島嶼にある南西諸島のカルストを対象に、熱帯型カルストの形状とその内部構造の把握、岩石強度の測定、石灰岩の溶食速度の実測をもとに、地形的特徴や形成プロセスを説明できるのかどうかを明らかにすることを目的とした。

3. 研究の方法

上述の研究目的を達成するため、次の(1)、(2)、(3)のサブテーマを設定し、研究を進めた。

(1) 熱帯型カルスト(円錐カルスト)の形状と内部構造

沖縄島本部半島山里には、熱帯に卓越する円錐カルストが分布する。円錐カルストを構成する円錐丘とコックピット(円錐丘に囲まれた溶食凹地)の形状や土層厚、土層構造を把握するため、地形測量と貫入試験を行った。対象地の地形は、円錐丘の山頂標高が 181 m、コックピットの底面標高が約 147 m である。円錐丘では検土杖により土壌深の計測を行い、コックピットでは斜面調査用簡易貫入試験機(筑波丸東株式会社製 TW-35)を用いて、測線に沿って計 30 地点で貫入試験を行った(図 1 の N0 ~ N29)。

(2) 亜熱帯島嶼における石灰岩の溶食速度

地形測量と土層厚を計測した円錐丘とコックピットにおいて、石灰岩の溶食速度を実測するための野外実験を実施した。野外実験は、石灰岩の未風化状態からの変化が追える点や、溶食速度の空間的差異を明らかにできる点で有効である。実験地は、円錐丘の山頂から山麓にかけて 3 地点、コックピットの中央部と縁辺部に 3 地点設けた(図 1 の赤字地点)。地点 1 は円錐丘山頂の岩盤上(標高 181 m)、地点 2 は山腹の土層-20 cm(標高 177 m)、地点 3 は山麓の土層-20 cm(標高 167 m)、地点 4 はコックピット縁辺部の土層-50 cm、地点 5 はコックピット中央部の土層-50 cm と-100 cm、地上+150 cm、地点 6 は土層-50 cm の地点である。実験には、南西諸島に分布する石灰岩 5 種で作製したタブレット状試料を用いた。使用した 5 種とは、調査地を構成する三疊紀の今帰仁石灰岩、ペルム紀の本部石灰岩、第四紀琉球層群の石灰藻球石灰岩および粟石石灰岩、第三紀の石垣島・星野石灰岩である。各試料の初期重量と実験後の重量減少量を実験期間中の溶食量とし、溶食速度を算出した。また、埋設地点の土壌を採取し含水比を求め、溶食速度との考察に用いた。

(3) 熱帯型カルスト(石灰岩堤)におけるケースハードニングと地形プロセス

沖縄島南部では、石灰岩堤(ライムストーンウォール)と呼ばれる、堤防状の高まりが断層沿いに分布する。熱帯~亜熱帯に卓越するこの地形は、急斜面においてケースハードニングが発生し、それが表面硬化をもたらし、ケースハードニングを受けていない周囲の石灰岩との溶食量の差によって形成されると説明されてきた(例えば Flint *et al.*, 1953)。しかし、これらの考えは観察に基づいた推論であり、ケースハードニングを受けたとされる石灰岩表面が実際に硬いことを示した研究は存在しない。この考えを実証するために、シュミットロックハンマーを用いて石灰岩堤表面の力学的硬度を計測することにより、ケースハードニング(表面硬化作用)が生じているかどうかの検証を行った。調査地は、糸満市大度地区および島尻郡八重瀬町破名城地区の琉球石灰岩で構成される石灰岩堤を選定した。これらの石灰岩堤を選定した理由は、道路を建

設・拡幅するために断層崖を人工的に切り取った、新鮮な石灰岩が露出する切取法面（以下、切取面）が共通して存在するためである。この切取面と断層崖表面の結果を比較することにより、断層崖表面における硬化の有無を判断できると考えた。

4. 研究成果

上述の(1)～(3)のサブテーマに対応して、以下の研究成果が得られた。

(1) 熱帯型カルスト（円錐カルスト）の形状と内部構造

コックピットにおける地形断面測量の結果からは、図1に示した4測線ともに底部はほぼ平坦であり、特に測線A-O-BとC-O-Dでは、最大でも1m程度の高低差しかないことがわかった。また、測線E-O-FとG-O-Hでは、それぞれ基点Oとコックピット周縁部に相当するEやGの間の高低差が2m程度であった。主たる谷の出口であるH方向以外は、コックピットの縁は急勾配をなし、周辺の円錐丘斜面へと連続する。円錐丘斜面における土層厚は20～30cm程度であり、山頂部では土層は確認されず、ピナクルが露出し岩塊が地表を覆う。コックピットの地表面の形状は平坦である一方、貫入試験で得られた基盤の形状は、中心にかけて低くなる船底状であることが明らかとなった。コックピット中央付近では3.5m以上と厚い土層が分布する傾向があり、基点Oの貫入試験結果(N0)からは、深さ2m位まではNc値10以下の軟弱な層であり、その後4m位までは遷移的に値が増加し、4.65mで基盤に到達している。コックピット中央付近と比較すると周縁部では土層は薄く、その厚さは1m以下である地点が多い。土層厚の空間分布からは、コックピット中央付近への水の集中と、弱線の存在による谷口H方向への水の流れによる溶食の進行が示唆された。

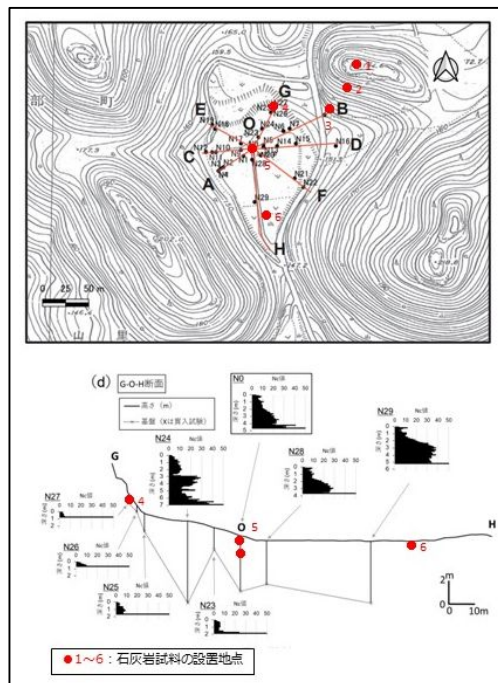


図1 コックピットの形状と土層厚，実験地点（廣瀬・大河内（2021）に実験地点を加筆）

(2) 亜熱帯島嶼における石灰岩の溶食速度

地形測量と貫入試験の結果を踏まえて、図1の円錐丘（地点1～3）とコックピット（地点4～6）を実験地として選定し、溶食速度を計測する野外実験を2021年10月から実施した。456日間の実験の結果、溶食速度は円錐丘よりもコックピットで大きく、地点別ではコックピット周縁部（上流側）の地点4（土層-50cm）で4.4～9.7%/yr、中央部の地点5（土層-100cm）で3.6～7.4%/yrとなり、地点5（土層-50cm）と谷口の地点6（土層-50cm）は2.2～3.8%/yrであった。地点5（地上+150cm）と円錐丘に設置した石灰岩の溶食速度は遅く、1%/yr未満であった。

また、試料埋設地点の土壌の含水比と溶食速度の関係をみると、含水比が大きい地点ほど、石灰岩の溶食速度は速い傾向があった。地上に設置した試料に比べ、土層中に埋設した試料では3～10倍の速さで溶食が進行しており、これは地表面の起伏とも一致する。なお、本州域で行われた湿潤温帯気候下での野外実験（漆原ほか、1999）では、地上と土層の石灰岩の溶食速度の差は2～3倍とされる。このことから、亜熱帯気候下における起伏の大きなカルスト地形の形成には、土層での溶食の速さが重要だと考える。コックピット内の土壌の含水比は、土質や土層構造、基盤深度やその形状の影響を受けて、空間的にも時間的にも変化するものと推察する。これらコックピット内の水文環境の把握は、今後の課題としたい。また、岩種別の溶食速度をみると、いずれの地点においても第四紀栗石石灰岩が最も速く、次に第四紀石灰藻石灰岩が続き、ペルム紀・三畳紀・第三紀の石灰岩が同列であった。第四紀の琉球石灰岩2種で溶食速度が高いのは、岩石の空隙率の大きさが影響するものと考えられる。

(3) 熱帯型カルスト（石灰岩堤）におけるケースハードニングと地形プロセス

沖縄島南部の断層沿いの石灰岩堤を調査対象に選定し、断層崖表面と新鮮な石灰岩が露出する切取面において、シュミットロックハンマーによる反発硬度試験を実施した。計測は、Aoki and Matsukura (2004)を参考に、10回の連打、記録を行い、得られたデータの上位3個の平均をとり、その値を力学的硬度として扱った。大渡と波名城の各地区における切取面と崖表面の硬度を比較してみると、最小値、最大値、平均値のいずれにおいても崖表面のほうが切取面より大きい。崖表面の硬度が新鮮な石灰岩の硬度よりも大きいという、この結果は、崖表面でケースハードニングが生じたことを示している。断層崖では、広範囲に炭酸カルシウムの再結晶物質が確認され、これらの再結晶物質が表層の間隙率を低下させ、緻密な硬化層を形成させ

ている可能性がある。断層沿いの石灰岩堤の形成に関して、溶食作用の観点からみると、次のようなプロセスをもつと推察される。まず断層運動により断層崖が形成され、断層崖表面では、何らかの理由によってケースハードニングが起こる。すなわち炭酸カルシウムの再結晶が表面を被覆したり、空隙を埋めてセメント化をうながしたりして、硬化層を形成させる。これにより、崖表面は、溶食に対する抵抗性が大きくなり、周辺の石灰岩に比べて溶食速度が遅くなる。その結果、崖頂部を高まりとした石灰岩堤が形成される。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計5件（うち査読付論文 3件／うち国際共著 0件／うちオープンアクセス 3件）

1. 著者名 羽田麻美	4. 巻 13
2. 論文標題 沖永良部島における石灰岩の溶食速度に関する予察的報告	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 地理歴史人類学論集	6. 最初と最後の頁 153-160
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.24564/0002020367	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -
1. 著者名 幸地佑朔・羽田麻美	4. 巻 22
2. 論文標題 沖縄島本部山里のcockpitにおける石灰岩の初期風化 野外実験によるアプローチ	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 沖縄地理	6. 最初と最後の頁 17-23
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.34527/okinawachiri.22.0_17	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -
1. 著者名 廣瀬 孝・大河内 萌	4. 巻 21
2. 論文標題 沖縄島本部山里の円錐カルスト地形に関する研究 - cockpitカルストの土層厚と土層構造 -	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 沖縄地理	6. 最初と最後の頁 45-54
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.34527/okinawachiri.21.0_45	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -
1. 著者名 羽田麻美	4. 巻 -
2. 論文標題 円錐カルスト地形研究の概要と今後の課題	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 法政大学地理学会創立70周年記念論文集	6. 最初と最後の頁 47-58
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 羽田麻美	4. 巻 562
2. 論文標題 日本列島南部の学習事例 南西諸島の自然と文化を中心に	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 地理月報	6. 最初と最後の頁 20-21
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計8件 (うち招待講演 2件 / うち国際学会 1件)

1. 発表者名 幸地佑朔・羽田麻美
2. 発表標題 沖縄島のコックピットにおける石灰岩タブレットの野外風化実験
3. 学会等名 日本地理学会 2023年秋季学術大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 平野優人・羽田麻美・青木 久
2. 発表標題 断層崖沿いに発達する石灰岩堤の形成に関する一考察
3. 学会等名 日本地理学会 2024年春季学術大会
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 羽田麻美
2. 発表標題 沖永良部島のカルスト地形
3. 学会等名 日本島嶼学会 2022年次 沖永良部大会 (招待講演)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 羽田麻美
2. 発表標題 カルスト地形の形成と発達過程について
3. 学会等名 石灰石鉱業協会 地質委員会・地質講演会（招待講演）
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 廣瀬 孝・大河内 萌
2. 発表標題 沖縄島本部山里に分布する円錐カルストとコックピットカルスト
3. 学会等名 沖縄地理学会 2021年度大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 高田協平・羽田麻美・渡邊康志
2. 発表標題 沖縄島与座岳周辺における地形・地質別にみた残丘の形態的特徴
3. 学会等名 日本地理学会 2021年春季学術大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 羽田 麻美
2. 発表標題 宮古島と石垣島における熱帯型カルスト
3. 学会等名 沖縄地理学 石灰岩地域シンポジウム
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Hada, A.
2. 発表標題 Solution Rates of Limestone Tablets in Okinawa Island, Japan
3. 学会等名 Asian Trans-Disciplinary Karst Conference 2024 (国際学会)
4. 発表年 2024年

〔図書〕 計1件

1. 著者名 羽田 麻美	4. 発行年 2021年
2. 出版社 ナカニシヤ	5. 総ページ数 -
3. 書名 沖縄島における円錐カルスト地形とその保全・漆原和子・藤塚吉浩・松山洋・大西宏治編『続 図説 世界の地域問題』	

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	青木 久 (Aoki hisashi) (30423742)	東京学芸大学・教育学部・教授 (12604)	
研究分担者	廣瀬 孝 (Hirose Takashi) (40305181)	琉球大学・国際地域創造学部・教授 (18001)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------