

琉球大学学術リポジトリ

沖縄島本部半島山里のコックピットにおける石灰岩の初期風化 ——野外実験によるアプローチ——

メタデータ	言語: ja 出版者: 沖縄地理学会 公開日: 2022-09-16 キーワード (Ja): コックピットカルスト, 石灰岩, 野外実験, 風化, 溶食速度 キーワード (En): cockpit karst, limestone, field experiment, weathering, solution rate 作成者: 幸地, 佑朔, 羽田, 麻美 メールアドレス: 所属:
URL	http://hdl.handle.net/20.500.12000/0002019448

【研究ノート】

沖縄島本部半島山里のcockピットにおける石灰岩の初期風化

——野外実験によるアプローチ——

幸地 佑 朔*・羽田 麻 美**

(* 琉球大学大学院生・** 琉球大学国際地域創造学部)

Initial Solution Rates of Limestone in Cockpit Karst, Okinawa Island:

Field Experimental Approach

KOUCHI Yusaku* and HADA Asami**

(*Graduate Student, University of the Ryukyus

**Faculty of Global and Regional Studies, University of the Ryukyus)

摘 要

本研究では、沖縄島本部半島山里の円錐カルスト地域を対象に、cockピット内の4地点（空中と土層）において石灰岩の溶食速度を明らかにするための野外実験を実施した。34日間の実験の結果、石灰岩の初期段階における溶食率（%）は、cockピット内の地点ごとに異なる。すなわち、土層における溶食率（%）は設置地点の土壌含水比が高いほど大きい。これは、土層構造や基盤岩の地形の影響を受けて土壌の含水比が異なり、石灰岩の溶食に影響を与えているものと推察する。また、空中と土層に設置した石灰岩を比較すると、土層において空中よりも約3～10倍の速さで溶食が進行している。

キーワード：cockピットカルスト，石灰岩，野外実験，風化，溶食速度

Keywords: cockpit karst, limestone, field experiment, weathering, solution rate

I はじめに

石灰岩の主な風化として、大気中などの二酸化炭素を含んだ雨水などが、石灰岩を溶かす溶解作用が挙げられる。一般的にはこの溶解作用に侵食作用をあわせて溶食と呼ばれる（漆原 2017）。溶食の進行は地形変化を伴い、地形を形成する大きな要因となる。しかしながら漆原ほか（1999）などの研究により、溶食速度は気候や地形、土壌条件など様々な理由から石灰岩の分布する地域ごと

に異なることがわかっており、また鈴木ほか（2000）の室内実験では、石灰岩の溶食速度は石灰岩の岩種によって異なる事も明らかにされている。このように、石灰岩の溶食速度を議論するためには、石灰岩の風化環境をより詳細に把握し、岩種別の溶食速度の特性を把握することが必要である。

南西諸島には石灰岩が広く分布し、円錐カルストや石灰岩堤、ドリーネなどのカルスト地形がみられる。中でも沖縄島本部半島山里の円錐カルストは、目崎（1984）や前門（1996）により亜熱帯気候環境

下での溶食により形成されたといわれる。特に前門 (1996) では、水の通り道になる所に高温多湿な環境下の炭酸ガス濃度の高い水が集中し、溶食速度が大きくなるために凹凸の大きな地形ができたと説明される。このようにカルスト地形の形成は気候条件に加えて、地形条件や土壌の性質などにも左右される。そのため、基盤の地形や土層分布など、より詳細な風化環境の差異も考慮したうえで、溶食速度を求める必要がある。

そこで本研究では、沖縄島本部半島山里においてタブレット型の石灰岩試料を用いた野外実験を行い、地形条件や土壌条件による溶食速度の空間的差異を検討する。また南西諸島に分布する岩種の異なる石灰岩を用いて実験を行い、岩種に応じて溶食速度が異なるかをあわせて検討する。本実験により、これまで研究例の少ない亜熱帯地域での石灰岩の溶食速度の算出と、石灰岩の岩種別の溶食速度の違いを把握する事を目的とする。

II 調査地概要

調査地は沖縄島北部本部町山里の円錐カルスト内にあるコックピットである (図 1, 図 2)。地質に関しては、木崎 (1985) や新城 (2014) によると、このコックピットがある山里の地質は今帰仁層の石灰岩が分布し、示準化石であるアンモナイトや二枚貝がみられることから、今帰仁層の石灰岩は中生代三畳紀に形成されたとされる。また新城 (2014) によれば沖縄島北部の古い基盤の地質体はプレート境界で形成された付加体であり、今帰仁層もその一部である。

本調査地は廣瀬・大河内 (2021) により土層厚や基盤の地形について調査が実施されたコックピットであり、当該地域の地形的特徴は次のことが明らかとなっている。コックピット内の底地は平坦な形状を呈し、底部の標高は 147 m である。コックピットの周囲は標高 194.6 ~ 220.0 m の円錐カルストの丘が四方を囲み、コックピットの東側を、北から南に横断するように舗装路が整備されている。コックピット内は個人所有の畑地であるが、現在耕作されているのは一部であり、ほとんどがススキなどの草本と放棄されたと思われるサトウキビが生育する。所有者によると、畑地にす

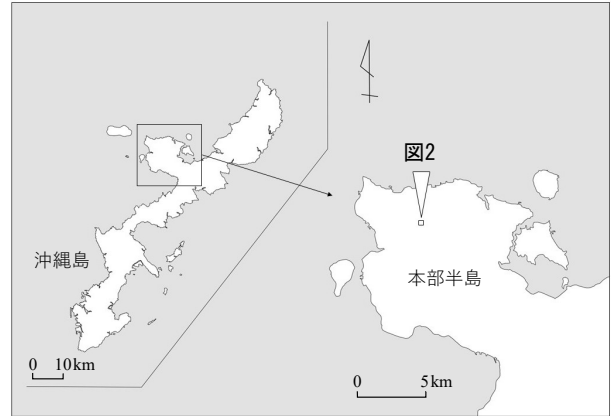


図 1 調査地の位置

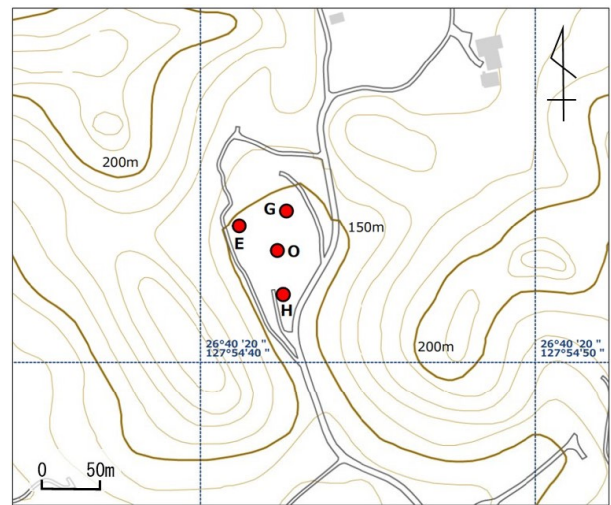


図 2 調査地点
(地理院地図に一部加筆)。

るために土砂の搬入や盛土は行っていないという。

本研究の実験期間は、2021年10月20日から2021年11月23日までの34日間である。気象庁の観測データによると、実験期間中の気象は、平均気温 21.8℃、最高気温 25.1℃、最低気温 19.0℃で、累計降水量 67.5 mm、日最大降水量 28.0 mm、降水量が 10 mm 以上の日は2日間のみである (図 3)。なお、降水量は本部の気象観測地点を、気温は名護の気象観測地点のデータを用いた。

III 研究方法

1. 野外実験の方法

今回の野外実験で使用した石灰岩は、本部半島本部層の石灰岩、石垣島星野の石灰岩、石灰藻球を主体とする琉球石灰岩、栗石と呼ばれる有孔虫

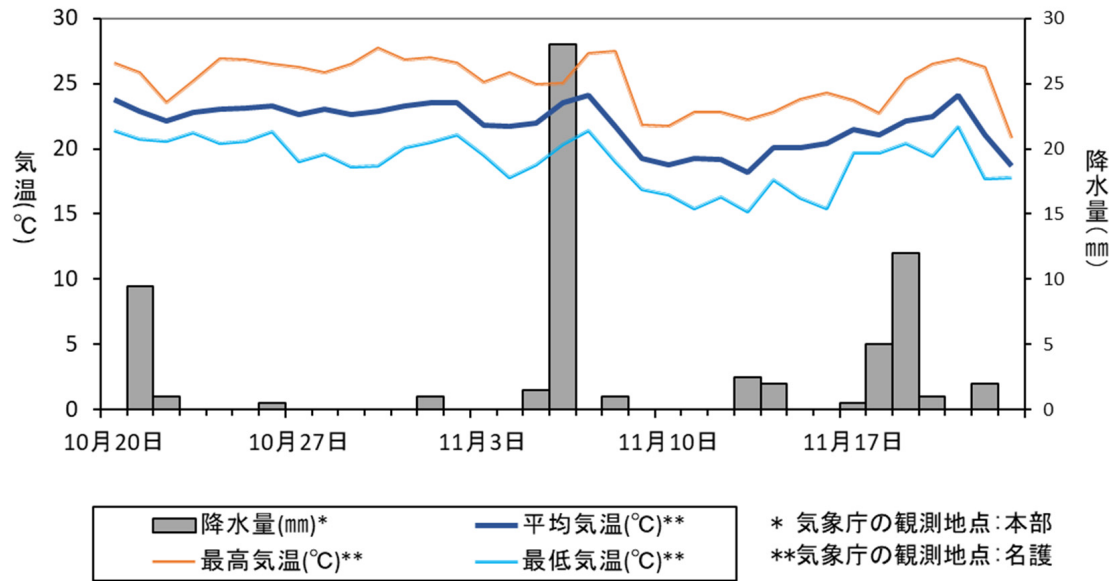


図3 実験期間中の日別気温・降水量 (2021年10月20日～11月23日)

を主体とする琉球石灰岩の4種である。なお便宜上、本研究ではそれぞれの石灰岩を本部石灰岩、星野石灰岩、藻球石灰岩、粟石石灰岩とよぶ。本部石灰岩は沖縄島北部本部層の中生代三畳紀の石灰岩であり、本部半島にある採石場で採掘されたものである。星野石灰岩は、石垣島星野の宮良層に分布する新生代第三紀始新世の石灰岩であり、現地で採取したものを使用した。また琉球石灰岩は、新城(2014)によるとサンゴ礁複合体で形成された生砕物からなる多孔質な石灰岩と説明される。生物由来の石灰岩であり、形成年代は古いものでも170万年前の第四紀更新世であり地質年代としてはかなり新しく、固結度が低い。そのため、藻球石灰岩と粟石石灰岩は、なるべく間隙が少ない部分(藻球石灰岩は基質部分)を選定し、タブレット試料に用いた。地質年代は二種類とも第四紀更新世であり、藻球石灰岩は琉球層群、粟石石灰岩は港川層に分布するもので、いずれも沖縄島南部の採石場で採取されたものを用いた。

この石灰岩を直径38mm、厚さ4mmの円盤型に加工し、石灰岩を設置するための小穴をあけた石灰岩タブレット試料を作製した。表面はあらかじめ#800で研磨し、表面の凹凸が少なくなるように調整した。この形状は漆原ほか(1999)や羽田・藁谷(2017)が用いたタブレット試料の形状とほ

ぼ同型である。また各石灰岩タブレット試料の重量は、8.8g～11.1gとタブレット毎に異なる。そのため溶食速度の計測は、設置前の試料重量から設置後の試料重量を引いた値を溶食量とし、溶食量を設置前の試料重量で割り、100をかけた値を溶食率(%)と定義した。

これらのタブレット試料は、設置前に超音波洗浄を行い、110℃で24時間乾燥させ、初期重量を計測した。実験後のタブレット試料は、設置前と同様に数分程度超音波洗浄をおこない、110℃で24時間乾燥し、重量計測を行った。タブレット試料の設置場所は、図2に示した4地点である。設置場所は、廣瀬・大河内(2021)により明らかにされている土壌厚・土層構造の計測結果をもとに選定した。廣瀬・大河内(2021)によると、図2の地点O(cockピット中央)付近で土壌が約5m堆積している。また地点G、地点O、地点Hを結ぶ土壌の断面構造は地点G付近が浅く、地点Hに向かうにつれて土壌が厚く堆積していると推定されている。

タブレット試料は各地点の地中50cmに設置した。また地点Oに関しては土層が深いことから、地中1mの箇所にもタブレット試料を設置した。また地点Oには架台を置き、地表1.5mの場所にタブレット試料を設置し、空中における溶食速度



図4 地点Oにおける石灰岩の設置地点
(空中1.5 m, 土層-50 cm, 土層-100 cm)

(2021年12月1日撮影)

の算出も行った(図4)。実験地点は合計6地点になる。なお実験開始前のコックピット内は草本が生育しており、地点O付近と地点H付近は高さ約50 cmの草本に覆われており、地点E、地点G付近は高さ約2 mのススキ・サトウキビに覆われている。今回の実験にあたり、それぞれの地点で埋設に必要な空間を確保するために、一部草本を刈り取った。

2. 土壌の含水比測定方法

地点別の溶食速度に影響を及ぼすとされるのは、前述の通り地形や土壌の水分量、CO₂濃度等である。このうち特に地点間の差が大きいと考えられるものとして、本研究では土壌水分量(土壌の含水比)に着目し、計測をおこなった

土壌の含水比は、タブレット試料回収時の2021年11月23日に測定した。円筒状の採土器(100 ml)を用いて、各地点のタブレット試料を設置した深さの土壌を採取し、水分を含んだ密封状態で

重量を測定した後、110℃の乾燥炉で24時間乾燥させ再度重量測定を行った。なお24時間後の重量測定後にさらに24時間乾燥させ、合計48時間後の重量測定を行った結果、若干の重量減少がみられた。したがって、48時間後の計測値をもとに、土質試験のJIS A1203に基づいて含水比を求めた。

IV 結 果

1. 石灰岩の溶食率

表1に地点・岩種別の溶食率の結果を示した。実験の結果、石灰岩の溶食率が最も高い、すなわち最も風化が速い石灰岩タブレット試料は地点Oの深さ1 mに設置した粟石石灰岩であり、溶食率は0.613%であった。次に地点Eの深さ50 cmに設置した粟石石灰岩で溶食率は0.521%である。反対に最も溶食が進んでいないものは地点Oの空中1.5 mに設置した本部石灰岩で溶食率は0.018%にとどまる。空中に設置した石灰岩の溶食率はいずれも0.018~0.057%の範囲であり、地表よりも地中で溶食の進行が速いことが確認された。

地点別に全岩種の溶食率を平均した値をみると、地点Oの地中1 mが0.449%、地点Eの地中50 cmが0.442%と、全地点で最も大きい値を示した。その次に地点Gの地中50 cmの0.275%と続く。反対に地点Oの地中50 cmや地点Hの地中50 cm、地点Oの空中1.5 mは、それぞれ0.168%、0.146%、0.045%と溶食がそこまで進んでおらず、全岩種の平均溶食率は0.045~0.449%の範囲であった。実験を行った全6地点のうち、溶食が進んでいる地点と溶食がほとんど進んでいない地点とに大きく分けられるが、溶食が進んでいる地点はコックピット縁辺にあたる部分か、コックピット中央の深い地点(地中1 m)である。反対に地点Oの地中50 cmや、コックピットの縁からやや離れた地点Hの地中50 cmでは溶食が進んでいない。

また岩種別に平均した溶食率をみると、溶食が最も進んでいるものは粟石石灰岩の0.327%である。次に藻球石灰岩の0.250%、星野石灰岩の0.224%、本部石灰岩の0.217%である。岩種別にみると、粟石石灰岩以外の3種の石灰岩では溶食率に大きな差異はない。

表1 地点・岩種別の溶食率の計測結果

地点	種類	実験前の 初期重量 g (A)	実験後の 重量 g (B)	溶食量 g (A-B)	溶食率 %	全岩種の 平均溶食率 %
地点O空中1.5 m	本部石灰岩	10.916	10.914	0.002	0.018	0.045
	星野石灰岩	11.156	11.150	0.006	0.054	
	藻球石灰岩	9.695	9.690	0.005	0.052	
	粟石石灰岩	8.823	8.818	0.005	0.057	
地点O地中1 m	本部石灰岩	11.108	11.062	0.046	0.414	0.449
	星野石灰岩	11.179	11.140	0.039	0.349	
	藻球石灰岩	10.185	10.142	0.043	0.422	
	粟石石灰岩	8.975	8.920	0.055	0.613	
地点O地中50 cm	本部石灰岩	10.916	10.902	0.014	0.128	0.168
	星野石灰岩	11.210	11.200	0.010	0.089	
	藻球石灰岩	10.230	10.209	0.021	0.205	
	粟石石灰岩	8.882	8.860	0.022	0.248	
地点G地中50 cm	本部石灰岩	10.970	10.941	0.029	0.264	0.275
	星野石灰岩	11.184	11.155	0.029	0.259	
	藻球石灰岩	10.001	9.975	0.026	0.260	
	粟石石灰岩	8.831	8.803	0.028	0.317	
地点E地中50 cm	本部石灰岩	10.871	10.831	0.040	0.368	0.442
	星野石灰岩	11.157	11.106	0.051	0.457	
	藻球石灰岩	10.404	10.360	0.044	0.423	
	粟石石灰岩	8.830	8.784	0.046	0.521	
地点H地中50 cm	本部石灰岩	10.898	10.886	0.012	0.110	0.146
	星野石灰岩	11.153	11.138	0.015	0.134	
	藻球石灰岩	10.312	10.298	0.014	0.136	
	粟石石灰岩	8.814	8.796	0.018	0.204	

2. 土壌の含水比

各地点の土壌水分量の割合である含水比は、平均 39.32% であった。地点別にみると地点 E の地中 50 cm において含水比が 47.76% と最も高く、次に地点 G の地中 50 cm で 41.73%、地点 O の地中 1 m で 42.30%、地点 O の地中 50 cm で 36.99% と続き、最も含水比が低いのは地点 H の地中 50 cm で 27.84% という値であった。

V 考 察

実験結果によると、地点 O の地中 1 m や地点 E の地中 50 cm において、溶食が顕著に進んでいることがわかった。一方で、地点 O の空中 1.5 m や地点 H の地中 50 cm などでは溶食が進んでいない。この

ような結果となった背景は、タブレット試料の設置場所の土壌水分量の差異だと考える。図 5 に土壌の含水比とすべてのタブレット試料の溶食率の関係を示した。今回計測した含水比と各タブレットの溶食率との間には正の相関がみられ、この結果は Akiyama *et al.* (2015) において秋吉台のドリーネで実施された野外実験の結果とも調和する。

岩種別にみると、粟石石灰岩はすべての地点で最も溶食率が高い。粟石石灰岩は平均重量 8.859 g であり、他の岩種と比較して約 1~2 g 軽い。すなわち粟石石灰岩は固結度が低く、他の岩種よりも間隙が多いことから、水と接触する表面積が大きいため溶食率が高いと推測される。

地点別にみると、溶食率は設置した地点によっ

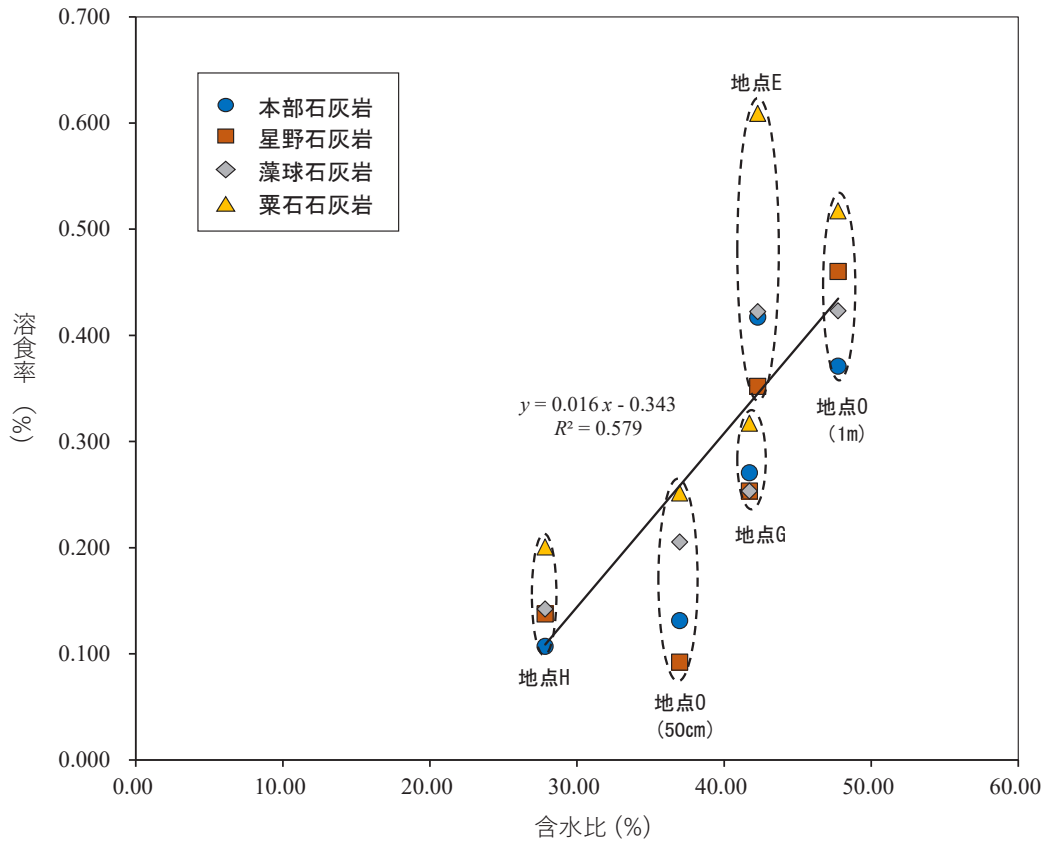


図 5 石灰岩の溶食率と土壤含水比の関係

で異なることが判明した。特に空中 1.5 m に設置したタブレット試料に対して、土層に設置したタブレット試料は約 3 ～ 10 倍の速さで溶食が進行しているという結果が得られた。これは、山里において地表に露出する石灰岩と地中にある石灰岩の溶食速度が大きく異なる可能性を示唆している。漆原ほか (1999) では、日本各地に設置した空中 1.5 m のタブレット試料と土層のタブレット試料との溶食速度は、土層に埋設したタブレットの方が平均して 2 ～ 3 倍の速さで溶食が進行しているという結果を示しているが、今回の実験結果はそれを大きく上回る。また、土層中の同じ深さ (地中 50 cm) に設置したタブレット試料においても、溶食率は地点別に異なる結果が得られた。設置したタブレット試料は同一のコックピット内にあり、地表の標高に大きな違いはないが、特に地点 O や地点 H で溶食率が低く、地点 E や地点 G は溶食率が高い。特に溶食率が高い地点 E と地点 G はコックピット縁辺部に位置し、廣瀬・大河内 (2021) に

よれば基盤岩までの深度は 1 m 未満であり、他地点に比べて浅い。そのため、地下水位の影響を受けて土壤の含水比が高くなり地点 O や地点 H よりも溶食率が高くなったと考えられる。また、それぞれの地点の土壤を観察すると、同一のコックピット内にもかかわらず地点毎に土色や粘性が大きく異なっていた。粘性が高い地点 E と地点 G は含水比も高く、これら土壤条件も溶食率に影響を与えたものと推察する。

VI おわりに

本研究ではコックピット内における石灰岩の風化速度の差異を明らかにする事に加えて、研究例の少ない亜熱帯地域での石灰岩の野外実験による溶食速度の算出や、石灰岩の種類別の溶食速度の違いを把握する事を目的として、石灰岩タブレット試料を用いた野外実験を行った。34 日間の実験の結果、石灰岩の溶食速度はコックピット内の地点ごとに異なった。特に、土壤中における溶食率

と土壌の含水比との間には正の相関がみられ、溶食の進行と土壌水分量との関係が明らかになった。また、空中と土層の石灰岩を比較すると、土層において溶食が約3～10倍の速さで溶食が進行しているという結果が得られた。これは、例えば漆原ほか(1999)において本州域で実施された実験結果よりもはるかに速く、空中と地中における溶食速度の差も大きい。石灰岩の岩種別の溶食率をみると、栗石石灰岩で大きく、その他3種の石灰岩に大きな差異はない。すなわち、石灰岩の岩種の違いよりも、地点ごとの風化環境(土壌水分量)の影響が強く反映された結果が得られた。

しかしながら、今回の実験期間は34日間であり、これまでの先行研究と比較して非常に短期間であることに留意しなければならない。八反地・松倉(2017)によると、こうした野外実験は最短でも実験期間を約1～2年程度に設定したものが多くとされる。また野外実験では初期段階において溶食が速く見積られる傾向があるという。これらを踏まえ、今回明らかとなった初期の風化特性に加え、長期的な傾向の把握も必要である。今後の課題として、実験の継続とともに土壌水分量のより詳細な計測や季節変化を考慮する必要があると考える。さらに石灰岩の溶食に関与すると考えられる基盤岩の形状や土壌の性質、土壌中のCO₂濃度の把握など、より詳細な石灰岩の風化環境を明らかにする必要がある。

本野外実験をおこなうにあたり、ブカレスト大学名誉教授の漆原和子先生に提供頂いた実験用架台を使用しました。琉球大学国際地域創造学部地理学教室の廣瀬孝先生には、野外実験の実施に際して調査地をご案内頂くとともに、日頃から多くのご教示を頂きました。また、同地理学教室の先生方にはゼミにおいてご助言頂きました。調査地の地権者である仲宗根正次氏には、cockピットでの調査を快諾して頂きました。現地調査では、琉球大学学生の國吉誠さん、東佳奈さん、出田伸一さん、伊藤想一郎さん、稲福彬さん、岡松知穂さん、嘉数力さん、加藤花月さん、座間味潤也さん、玉城魁聖さん、田中友啓さん、桃原康平さん、琉球大学卒業生の中田麗雄さんにお世話になりました。実験で使用した石灰岩タブレット試料は、

MicroRangeの知念正昭さんに作製頂きました。3Dレーザー顕微鏡やマイクロスコプなどの分析機器は琉球大学研究基盤センターの機器を使用しました。本研究をおこなうにあたりお世話になった以上の方々へここに記して感謝を申し上げます。また本研究は文部科学省科学研究費補助金19K01160により実施した。

(受付 2022年4月30日)

(受理 2022年7月15日)

文献

- 漆原和子・鹿島愛彦・榎本浩之・庫本正・Franz-Dieter MIOTKE・仲程正・比嘉正弘(1999):日本における石灰岩溶食率の経年変化とその地域性. 地学雑誌, 108 (1), 45-58.
- 漆原和子(2017):溶食. 日本地形学連合編, 鈴木隆介・野上道男・砂村継夫責任編集『地形の辞典』, 朝倉書店, 146.
- 木崎甲子郎編(1985):『琉球弧の地質誌』沖縄タイムス社
- 新城竜一(2014):琉球弧の地質と岩石——沖縄島を例として——. 応用力学論文集A2(応用力学), 70 (2), 応用力学論文集, 17, 1_3-1_11.
- 鈴木麻沙美・高屋康彦・松倉公憲(2000):石灰岩タブレットを用いた溶解実験. 筑波大学陸域環境研究センター報告, 1, 19-26.
- 八反地剛・松倉公憲(2017):土壌中における炭酸塩岩の風化速度とその制約条件——野外風化実験からのアプローチ——. 地学雑誌, 126 (3), 355-367.
- 羽田麻美・藁谷哲也(2017):熱帯環境下(カンボジア, アンコール・ワット寺院)における炭酸岩塩タブレットの風化特性. 地学雑誌, 126 (3), 343-354.
- 廣瀬孝・大河内萌(2021):沖縄島本部山里の円錐カルスト地形に関する研究——cockピットカルストの土層厚と土層構造——. 沖縄地理, 21, 45-54.
- 前門晃(1996):多様な琉球列島のカルスト地形. 漆原和子編:『カルスト その環境と人びとのかかわり』大明堂, 161-167.
- 目崎茂和(1984):日本の主要カルストの地形形成について. 琉球大学法文学部紀要史学地理学篇, 第27・28合併号抜刷, 139-169.
- Akiyama, S., Hattaji, T., Matsushi, Y. and Matsukura, Y. (2015): Dissolution rates of subsoil limestone in a doline on the Akiyoshi-dai Plateau, Japan: An approach from a weathering experiment, hydrological observations, and electrical resistivity tomography. *Geomorphology*, 247, 2-9.