

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 6 日現在

機関番号：17401

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2014～2016

課題番号：26550011

研究課題名(和文)異なる植生下の地下水涵養システムと鍾乳石形成の鍾乳洞内での“その場観測”

研究課題名(英文)The system of groundwater percolation and the growth mechanism of stalagmites under different covers based on in situ observation within limestone caves

研究代表者

松田 博貴 (MATSUDA, HIROKI)

熊本大学・大学院先端科学研究部(理)・教授

研究者番号：80274687

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,000,000円

研究成果の概要(和文)：南大東島における植生による地下水浸透メカニズムとそれに伴う鍾乳石形成メカニズムの違いについて検討した。その結果、二酸化炭素濃度の高い土壤に浸透した降水が多量の二酸化炭素を溶存し、その結果、下位の基盤炭酸塩岩を溶解する。しかし少雨期には、土壤の乾燥により、降水浸透する滴下水で蒸発が活発に起こり、それに伴い二酸化炭素が脱ガスする。それにより、滴下水の過飽和度が高くなり、石筍の成長速度が速くなる。洞内の滴下水量データから甘蔗園土壤の方が乾燥しやすいことが推定され、そのため、甘蔗園下の方が過飽和度は高くなり、石筍の成長速度は速くなることが明らかになった。

研究成果の概要(英文)：To clarify the groundwater (GW) percolation system and the growth mechanism of stalagmites under different vegetation covers, the measurements of the soil and cave environments and water chemistry of the drip waters (DW) were carried out in Minami-Daito Island. Saturation index for calcite (SIc) in DW are positive and are higher in dry season and under sugarcane field than under forests. The amounts of DW are relatively constant under forests, while those change responding to rainfall under sugarcane field. From the results, the growth mechanism of stalagmites is as follows; At first, GW has high CO₂ due to percolating through soil with high CO₂, and dissolves underlying carbonate rocks. With GW flowing downward, degassing of the dissolved CO₂ with evaporation leads to increase in the SIc. Especially, the SIc become higher by intense evaporation in dry season, which is more active in sugarcane field. Consequently, the growth rate of stalagmite under sugarcane field is higher.

研究分野：炭酸塩堆積学

キーワード：鍾乳石 炭素・酸素同位体比 地下水涵養 植生変遷 炭酸塩続成作用 南大東島

1. 研究開始当初の背景

鍾乳石は、陸域炭酸塩の代表的なものの一つであり、地表植生や気温、降水量などの陸域気候により、その成長速度や化学組成・安定同位体比が規制されている。これまで申請者を含む研究グループは、鍾乳石に記録された陸域気候変動の復元を試みると共に、鍾乳石に記録された人為的な植生変遷や酸性雨などの環境変化の解明を行ってきた。一方、炭酸塩岩は、炭化水素鉱床や地下水資源の貯留岩として重要な役割を果たしており、そのため申請者は、炭酸塩岩の貯留岩特性や亜熱帯島嶼域における地域水循環と地下水持続利用システムについて検討を行ってきた。その中で、亜熱帯炭酸塩大洋島の代表であり、1900年に初めて入植者により開島された沖縄県南大東島の鍾乳石において、入植を境にその成長速度と炭素同位体比が激変することが明らかになった。これは入植に伴う地表植生の改変により、地下水涵養システムと地下水の水質化学的性質が大きく変化したものと推定された。

2. 研究の目的

亜熱帯島嶼域の異なる植生下での地下水涵養システムと鍾乳石形成過程の相違について、亜熱帯炭酸塩大洋島の代表である沖縄県南大東島の鍾乳洞を対象として、

(1) 鍾乳洞内・洞外の気象観測ならびに鍾乳石の分析を通じて、異なる地表植生下(亜熱帯天然林<森林植生>・サトウキビ畑<草原植生>)での地下水涵養システム、特に降雨イベントに対するレスポンスや涵養量などの相違について明らかにする。

(2) 鍾乳石と地下水の各種分析を通じて、地表植生ならびに気候変動に伴う成長速度・安定同位体比などの鍾乳石形成過程の相違について検討する。

(3) 上記を基に、亜熱帯島嶼域における地下水資源の持続的利用ならびに鍾乳石に記録された気候変動と地表植生の変遷について解明する

ことを目的とした。

3. 研究の方法

亜熱帯島嶼域の異なる地表植生下での地下水涵養システムと気候変動に伴う鍾乳石形成過程の相違を明らかにするために、沖縄県南大東島の鍾乳洞を対象として、以下の研究を実施した。

1) 鍾乳洞現地観測及び試料採取

異なる地表植生下での地下水涵養量と洞内環境の違い・変化を明らかにするために、山下洞 地表植生 洞南部-亜熱帯天然林
洞北部-サトウキビ畑
今村洞 地表植生 サトウキビ畑
において、雨量計等の気象観測機器を設置し、

各降雨イベントあるいは少雨に伴う降雨の地下浸透時間の呼応関係ならびに滴下水量の変化パターンを把握すると共に、季節変化に伴う洞内環境変化の観測を行った。調査では、鍾乳洞内のルートマップを基に、航空写真との比較により、地表植生の異なる洞内に自記雨量計(山下洞4地点/今村洞2地点)を設置し、平成26年~28年の間の約2年間にわたり、洞内滴下水量と洞内温度の連続観測を実施した。また機器設置時ならびにデータ回収時に、機器設置地点の二酸化炭素濃度測定と同位体分析用二酸化炭素試料を採取した。また洞外環境データとして、洞内滴下水の涵養場である鍾乳洞直上において、土壌二酸化炭素濃度測定と土壌二酸化炭素を採取した。さらに異なる地表植生下での鍾乳石の成長過程の違いを明らかにするために、雨量計設置地点近傍より鍾乳石を採取すると共に、滴下水の水質化学的性質の違いとその季節変化を明らかにするために、3ヶ月置きに滴下水を採取した。

2) 採取試料分析

採取鍾乳石は、鍾乳石の同位体記録を明らかにするために、年縞による成長速度と炭素・酸素安定同位体比測定を実施した。また滴下水については、地表植生による水質化学的性質の違い、ならびに同一植生条件下での季節による水質化学的性質の変動を明らかにするために、滴下水の水素・酸素同位体比測定、溶存無機炭素の炭素同位体比測定、アルカリ度測定、溶存イオン分析を実施した。また土壌・洞内二酸化炭素については、地表植生による炭素安定同位体比の違い、ならびに同一植生条件下での季節変動を明らかにするために、炭素同位体比測定を実施した。

4. 研究成果

(1) 鍾乳洞洞内環境の季節的变化

現地観測を実施した甘蔗園下に位置する今村洞と、甘蔗園と亜熱帯天然林下に伸びる山下洞では、洞内気温は、両洞とも洞奥に位置する観測点(RT-1/-3/-4/-6地点)では、年較差0.86~1.73°Cと小さく、最高気温は23.67~23.77°Cとほぼ同じ値を示すが、滴下水量が大きく増減する山下洞RT-1地点では最高24.55°Cを示す。一方、山下洞の洞口に近い観測点(RT-2/RT-5地点)では、年較差は2.40~3.13°Cであり、最高気温は洞奥と同じであっても冬季(2月)には最低気温が20°Cを下回る。これは洞口付近では、外気と鍾乳洞内との換気が生じていること、また洞内の温度は滴下水量(滴下水の温度)に規制されていることを示唆する。

洞内の二酸化炭素濃度は、森林植生下の山下洞洞奥では年間平均7,000~8,000ppmで、秋季(11月)には約20,000ppmに達するのに対し、甘蔗園下の観測点では年間平均で2,000ppm台であり、夏季(8月)に6,800~8,400ppmとなる。気温変化において同様の傾

向を示す観測点であっても、二酸化炭素濃度とその季節変化に違いがあり、これは植生の違いによる有機物量とその分解、ならびに涵養システムの違いに起因すると推定される。

(2) 洞内滴下水量と降雨イベントとの関係

降水に対する滴下水量の変動では、大きく1) 大きな季節変動、2) 降水イベントに対するタイムラグを伴った滴下水量の増加、ならびに3) 極端な降水に対するバイパス効果、の3つのパターンが認められた。甘蔗園下では、主に上述の2)が観察され、地点によりタイムラグの長さが異なる。また降水イベントの間隔によっては、滴下水量増加が認められない場合もある。これらの涵養メカニズムは、主にピストン流と考えられ、土壌層の特性と厚さ、そしてその湿潤状態に起因しているものと考えられる。一方、森林植生下の観測点では、主に上述の1)と3)が観察され、明らかに甘蔗園下とは異なる変化を示す。これは森林植生では、腐葉土層における保水や樹木による蒸発散が甘蔗園とは異なることと、埋没ドリーネやフラクチャの発達など、局所的な地形・地質条件が異なることによるものと考えられる。また滴下水量と地下水位を比較すると、地下水位の大きなトレンドは、甘蔗園下での滴下水量の変化（特にRT-2地点）と概ね一致していることから、地下水位は、南大東島の7割を占める甘蔗園における土壌性質と土壌湿潤状態に規制されていると判断される。

(3) 洞内滴下水の水質化学的性質

滴下水の Ca^{2+} ・ Mg^{2+} 濃度とアルカリ度は、両洞とも高い値を示し、基盤の炭酸塩岩の顕著な溶解が認められる。また方解石の飽和指数(SIc)は、森林下で-0.18~+1.54(平均0.76)、甘蔗園下で+0.24~+1.45(平均0.88)であり、森林下の夏季を除いて過飽和にある。またSIcは、少雨期の冬季に高く、夏季に低い傾向にあり、同じ夏季でも少雨時には高い。滴下水の無機溶存炭素同位体比($\delta^{13}\text{C}_{\text{DW-DIC}}$ 値)は、甘蔗園下で-5.58~-10.71‰、森林下で-10.13~-13.25‰で明瞭に異なる。また洞内 CO_2 濃度は、いずれの植生下でも夏季~秋季に高く(森林下-最大17,800ppm;甘蔗園下-最大6,800ppm)、明瞭な季節変化を示す。一方、土壌 CO_2 濃度は、森林植生では季節変化は認められず、その値は洞内よりも低い(600~3,300ppm)のに対し、甘蔗園では洞内と同様に季節変化を示す(400~6,200ppm)。これは森林植生での測定深度よりも下位に、土壌 CO_2 濃度が高い部分がある可能性が指摘される。また土壌二酸化炭素同位体比($\delta^{13}\text{C}_{\text{Soil}}$ 値)は、森林植生で-17.40~-24.31‰、甘蔗園で-11.40~-15.54‰で明瞭に異なる。さらに滴下水量は、森林下では、定常的な水量が認められるのに対し、甘蔗園下では、降雨イベントに呼応して水量の増加が認められる。しかし、少雨期にはその増加時期に遅れ

が生じ、早魃期には、滴下水量は増加しない。これは、森林土壌に比べ甘蔗園土壌はより頻繁に乾燥化することを意味する。

(4) 通気帯続成作用と鍾乳石形成メカニズム
南大東島における植生による通気帯続成過程と鍾乳石形成メカニズムの違いは、次のように説明される。まず CO_2 濃度の高い土壌に浸透した降水は、多量の CO_2 を溶存し、それにより下位の基盤炭酸塩岩を溶解する。しかし少雨期の冬季や夏季でも降水が少ない時には、土壌と基盤岩の乾燥により、降水浸透する滴下水の蒸発が活発に起こり、それに伴い CO_2 が脱ガスする。その結果、滴下水のSIcは高くなり、石筍の成長速度は速くなる。この時、同位体分別効果により軽い CO_2 が選択的に脱ガスするため、 $\delta^{13}\text{C}_{\text{DW-DIC}}$ 値は大きくなる。このことは、SIcが高い滴下水ほど $\delta^{13}\text{C}_{\text{DW-DIC}}$ 値が大きいことから支持される。森林と甘蔗園では、洞内の滴下水量データから甘蔗園土壌の方が乾燥しやすいことが推定され、そのため、甘蔗園下の方がSIcが高くなり、石筍の成長速度は速い。さらに森林下では、夏季の洞内 CO_2 濃度が高いため成長速度は遅い。一方、石筍の炭素同位体比($\delta^{13}\text{C}_{\text{Stal}}$ 値)は、 $\delta^{13}\text{C}_{\text{DW-DIC}}$ 値を反映し、これは $\delta^{13}\text{C}_{\text{Soil}}$ 値、すなわち、植生がC3植物(森林)かC4植物(甘蔗園)であるかに起因し、甘蔗園下の石筍の $\delta^{13}\text{C}_{\text{Stal}}$ 値の方が重くなる。

以上の結果は、水文学の観点では、これまで気象データを基に地表植生ごとの蒸発散量、土壌水分量ならびに地下水位の変動などから地下水涵養システムや地下水資源量の推定がなされてきたのに対し、本研究では鍾乳洞内の滴下水量を基に、具体的に降雨イベントと地下水涵養の関係を明らかにした点で大きな意義がある。また近年の地球温暖化に伴う地下水資源脆弱化の懸念に対して、植生により地下水涵養システムが異なるとする知見は、淡水レンズからの取水量、遊休地・耕作放棄地の地表利用形態など広範な分野への波及効果が期待される。一方、鍾乳洞・鍾乳石に関する研究では、これまで地表から鍾乳洞に至るまでの過程はブラックボックスとなっていたが、気象情報、地表状況、滴下水の水質化学的性質とリンクした鍾乳石分析データは、鍾乳石に記録された古気候情報解析においてきわめて貴重であり、これまで分離が困難であった鍾乳石に記録された気候変動と人為的影響などを、これまで以上に詳細に検討することが可能となり、小氷期や地域的環境変遷の解明に大きな貢献が期待される。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計12件)

①梁 熙俊・田原康博・佐伯亜由美・松田博貴・嶋田 純, 2016, 数値シミュレーションによる地表植生の変化と海水準上昇に伴う淡水レンズ賦存特性の評価. 月刊地球, 査読無, 38巻, pp.25-32.

②鹿島美香・嶋田 純・松田博貴, 2015, 鍾乳洞滴下水の水質化学的性質. 月刊地球, 査読無, 37巻, pp.530-539.

③松田博貴・鹿島美香・梁 熙俊・利部 慎・嶋田 純, 2015, 鍾乳洞内滴下水量に基づく異なる植生下における地下水涵養特性. 月刊地球, 査読無, 37巻, pp.521-529.

④梁 熙俊・嶋田 純・松田博貴・利部 慎・董 林垚, 2015, 島嶼地域における地下水位の時系列解析及び電気伝導度を用いた淡水レンズ形状の評価ー沖縄県南大東島の例ー. 地下水学会誌, 査読有, 57巻, pp.187-205.

⑤山田 努・松田博貴・馬淵しの・財津良太, 2014, 鹿児島県沖永良部島クリンジョフキにおける石筍形成時の滴下水一方解石間の同位体効果. 洞窟学雑誌, 査読有, 39巻, pp.18-36.

[学会発表] (計 1 4 件)

①松田博貴, 炭酸塩続成作用と炭酸塩堆積物に基づく古環境解析 (招待講演). 第 123 回日本地質学会学術大会, 2016 年 9 月 12 日, 日本大学 (桜上水).

②松田博貴・鹿島美香・嶋田 純, 異なる植生下の通気帯炭酸塩続成環境における続成過程と鍾乳石形成メカニズムー沖縄県南大東島を例としてー. 第 123 回日本地質学会学術大会, 2016 年 9 月 12 日, 日本大学 (桜上水).

③Matsuda, H., Kashima, M. Shimada, J., Growth mechanism of stalagmites under different vegetation cover: a case study of stalagmites in Minami-Daito Island, Japan. 32nd International Meeting of Sedimentology, Marrakech (Morocco), 2016年5月23～26日.

④Shimazu, T., Matsuda, H., Asahara, Y., Yagi, M., Carbonate depositional system and distribution of dolomite of a carbonate buildup - an example from the Upper Miocene to Pleistocene Daito Formation (Minami-daito-jima, southwestern Japan). 15th Bathurst Meeting, Edinburgh (Scotland), 2015年7月14～16日.

⑤ Matsuda, H., Kashima, M., Sato, Y., Yoshimura, K., Shimada, J., Differences of the growth mechanism of stalagmites beneath different vegetation in Minami-Daito Island, southwest Japan. 19th International

Sedimentological Congress, Geneva (Swiss), 2014年8月19日.

[図書] (計 0 件)

[産業財産権]

○出願状況 (計 0 件)

○取得状況 (計 0 件)

[その他]

南大東村調査報告会, 2015 年 6 月 8 日, 南大東村役場 (沖縄).

6. 研究組織

(1)研究代表者

松田 博貴 (MATSUDA, Hiroki)

熊本大学・大学院先端科学研究部・教授
研究者番号: 80274687

(2)研究分担者

なし

(3)連携研究者

なし

(4)研究協力者

なし