

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 9 日現在

機関番号：10101

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2013～2014

課題番号：25630205

研究課題名(和文) 化学的・生物学的プロセスによって形成される石灰岩ステップ地形

研究課題名(英文) Travertine steps formed by chemical and biological processes

研究代表者

泉 典洋(Norihiro, Izumi)

北海道大学・公共政策学連携研究部・教授

研究者番号：10260530

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,100,000円

研究成果の概要(和文)：石灰岩地帯には、数十センチから数メートル規模の石灰華段や、湖群を伴う数百メートルから数キロ規模の石灰岩天然ダム群が形成されることがある。前者が脱炭酸ガスによる石灰分の析出という化学的プロセスであるのに対して、後者はコケやバクテリアによる生物学的プロセスであると言われている。本研究では、理論解析および現地観測、実験を行うことによって、これら石灰岩ステップ地形の形成プロセスを明らかにした。大規模石灰岩ダム群の形成プロセスを簡単な数学モデルを用いて解析し、形成条件や形状の特徴を明らかにし、妥当性を現地観測によって確かめた。また水路実験の結果を基に化学的プロセスによる石灰岩地形の形成モデルを提案した。

研究成果の概要(英文)：Several tens of centimeters to several meters large travertine terraces, and several hundreds of meters to several kilometers large travertine dams are observed in regions covered with limestone. It is thought that the formers are formed by mainly chemical processes such as the separation of limestone due to decarbonation while the latters are caused by biological processes due to bacteria. In this study, we investigated the formation processes of the limestone step morphology through theoretical analysis, field observations, and flume experiments. We made an analysis of the formation of large scale travertine dams formed by biological processes, and clarified the formation conditions and the morphological features of travertine dams. The results of the analysis were found to be consistent with the facts observed in the field. Based on experimental results, we also proposed a mathematical model for explaining the formation of travertine terraces formed mainly by chemical processes.

研究分野：水工土木工学

キーワード：石灰岩 ステップ地形 化学的プロセス 生物学的プロセス プリトヴィツェ湖群 石灰華段 二酸化炭素

1. 研究開始当初の背景

石灰岩で覆われた地域には、カルスト地形と呼ばれる様々な特徴的な地形が見られることが知られている。これは、二酸化炭素が溶けて酸性となった雨水や表流水、地下水が石灰岩を溶食したり、溶解した石灰分を再沈殿させるためである。その特徴的な地形の一つに、石灰華段と呼ばれる石灰質で形成された数十センチから数メートルスケールのステップ地形がある。また形状は石灰華段に似ているものの、それより遥かに大規模な数百メートルから数キロメートルのスケールをもつ石灰質堆積物のダムがステップ状に形成されることによって、幾つもの湖が連なる地形が形成されることがある。前者は脱二酸化炭素過程による石灰質の析出という純粋な化学的プロセスによって形成されるのに対して、後者はコケやバクテリアによる生物学的プロセスが卓越する状況下で形成されることが推測されている。

一方、地形形成の力学は20世紀後半に河川工学や地球物理学によって始められ、近年急激な進歩を遂げMorphodynamicsという一つの学問分野を形成するに至っている。これまでのMorphodynamicsでも地形形成プロセスに植生の影響を取り入れた研究が既に始まっているが、化学的プロセスと生物学的プロセスを両方考慮したものは存在していなかった。

2. 研究の目的

本研究の目的は主として次の2つである。1つ目は、石灰岩の溶解と析出のプロセスを表現する数学モデルを構築し、それを用いて石灰岩ステップ地形の形成プロセスを明らかにする。2つ目は、プリトヴィツェ湖群の現地調査を行い石灰岩ダム地形の特徴を明らかにするとともに、水路を用いた石灰岩ベッドフォームの形成実験を行い、石灰岩の溶解と析出やベッドフォームの形成プロセスを現地観測および実験の両面から明らかに

し、数学モデルの妥当性を検証する。

3. 研究の方法

本研究では、次の3つの方法で石灰質ステップの形成にアプローチした。

(1) 数学モデルの構築と数学モデルを用いた理論解析

(2) クロアチア・プリトヴィツェ湖群の現地調査に基づく地形モデルの作成

(3) 石灰分に過飽和な溶液からの析出による河床地形形成実験

以下にそれぞれの成果を述べる。

4. 研究成果

(1) 理論解析。

プリトヴィツェ湖群に代表されるような石灰岩天然ダム群は、石灰岩表層に繁茂した苔に生息するシアノバクテリア等、二酸化炭素を必要とするバクテリアが流水中の二酸化炭素を消費することによって二酸化炭素濃度が低下し、石灰分の飽和溶解度が低下することによって流水に含まれていた石灰分が析出して形成される。解析が容易となるよう、このプロセスを次のように単純化する。バクテリアの生物活動に必要な栄養分は流水に十分に含まれており、バクテリアのハビタットである苔の繁茂と自身の光合成に用いられる光が最も重要な条件であるとする。光の強度に応じて生物活性が上がるとすると、二酸化炭素の吸収量は生物活性と正の相関を持つから、石灰岩の析出量も光の強度と正の相関を持つことが期待される。光の強度は水深と負の相関を持つことから、石灰岩の成長速度も水深と負の相関を持つことになる。このような考察から石灰岩の成長速度を水深で表す式を提案した。また、この式に浅水流方程式を組み合わせて、石灰岩ベッドフォーム形成の数学モデルを構築した。

石灰岩ダムはいずれも頂部を成長させ、高さを増していく。提案した数学モデルを用い

て、ある一定の形状を保ったまま一定の速度で成長するダム頂部の保存形を解析的に求めた。その際、形状を決める重要なパラメータは、いずれも限界水深（フルード数が1となる水深）で無次元化した光合成ができる最大水深 H_p および苔が流されずに存在できる水深 H_d 、底面摩擦係数 C_f の3つである。特に前者の2つが最も重要で、保存形が存在するのは $H_p > 1$ かつ $H_{dl} < H_d < 1$ が成立するときである。ここで H_{dl} は H_p とともに若干増加する H_d の下限値である。また、 H_p が大きくなればなるほど、 H_d が1に近くなればなるほどダム頂部は下流側へ傾いた形状を持つ。その形状の例を図1に図示する。

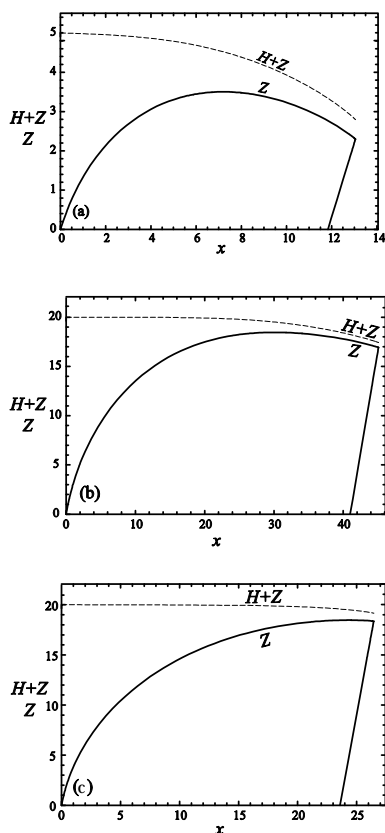


図1 解析で得られた石灰岩ダム頂部の保存形。(a) $H_p = 5, H_d = 0.5$, (b) $H_p = 20, H_d = 0.5$, (c) $H_p = 20, H_d = 0.8$. いずれも $C_f = 0.01$.

化学的プロセスが卓説する石灰華段は主として、光の当たらない石灰岩鍾乳洞内部や、バクテリアが住みにくい熱水環境で形成される。この場合、石灰分を析出させる主たる

要因は大気中の二酸化炭素分圧の低下や温度の上昇による脱二酸化炭素過程である。この場合、石灰分の析出量を算定しベッドフォームの形成を表現するためには二酸化炭素濃度を支配パラメータとした析出・溶解の方程式および二酸化炭素濃度を評価するための輸送方程式が必要となる。これらの方程式を流れの方程式とともに適切な境界条件の下で解くことにより、界面不安定に起因するベッドフォームの初期形成過程や石灰華段などの発達した石灰岩ステップ地形の形状や形成条件が明らかとなる。これらの解析の詳細については今後の課題である。

(2) クロアチア・プリトヴィツェ湖群の現地調査に基づく地形モデル

この課題の背景ともなっているクロアチアのプリトヴィツェ湖群の現地調査を行った。1つの湖（ないしは淵）およびその周辺を構成する地形には共通の特徴がある、すなわち、小滝と淵と小水路からなるユニットであることがわかった(図2)。淵の上流端は滝の落下により深く掘れており、下流側へ徐々に浅くなる。下流端には上流端の滝を中心とする同心円状の“堰”ができており、この上にフキ属と思われる植物やイネ科と思われる植物が繁茂する。淵の両脇(場所によっては片方のみ)には淵を囲むようにして急勾配の水路が形成されており、流速の大きな流れがある。水路内にはほぼ例外なくステップ地形が形成されているが、水路内には植生は無い。水路の側壁に近いところなどで水が淀んでいるところでは、石灰分の沈着により水路底の落ち葉や礫などが白く覆われている。このように、この淵の成長(下流端の成長・上昇)には植物の光合成の影響があるであろう事が推測される。逆に、淵を囲んで流れる水路内では、高領域の流れによって化学的析出の速度に場所による違いが生じ、ステップ地形を形成しているものと考えられる。



図 2 (a) プリトヴィツェ湖群地域における典型的な小滝-淵-小水路ユニット。(b) 小水路内に発達するステップ。

(3) 石灰分に過飽和な溶液からの析出による河床地形形成実験

平成 25 年度と 26 年度でそれぞれ異なる実験システムを作成して実験を行った。

平成 25 年度の実験。

実験目的．石灰質堆積物のステップ形成については先行実験がない為、テキサス大学で行われていた石灰質堆積物による河道形成の実験を参考にして、まず水路内に石灰質堆積物を析出させ、ステップが形成される事を確認する事を目的とした。

実験方法．実験は大阪工業大学情報科学部の地球環境研究室で行った。水路は長さ 180 cm、高さ 5 cm、幅 2 cm のアクリル製で、上流端に堰を付け、底面には豊浦硅砂を接着し粗度をつけた。水路を高さ 150 cm、横 168 cm、幅 48 cm のアルミ製土台枠に勾配 2° で設置した(図 3 参照)。密閉可能な 200 リットルのタンクに蒸留水、石灰岩約 9.8 kg を入れ、さらに $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 粉末 1000 g を入れた。ここに 30 分毎にドライアイス 200~250 g を投入し(ドライアイスの総量約 3.2 kg/日)、石灰分に飽和した水溶液とした。投入後 5 分後に密閉可能タンク内、水路上端、水路下端の 3 点で溶液の pH、電気伝導度、温度を測定した。

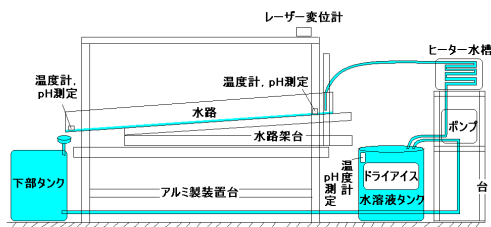


図 3 実験装置概要図

このタンクから水路へ送液ポンプで水溶液を輸送するが、チューブをヒーターで 80 まで温めた水の中を通す事により、水路上端に到達するまでに溶液の温度を上げ、溶液が水路に解放された時に脱ガスが起こりやすいようにした。水路下端には水溶液を受けるタンクを設置し、別の送液ポンプで水溶液をもとのタンクに戻す。実験後の水路底の地形をレーザー変位計により測定し、水路底面をデジタルカメラで撮影した。

実験は平均流量(a)4.65 cm^3/s 、(b)16.88 cm^3/s の 2 パターンを行った。一日約 6~8 時間通水し、(a)は 8 日間、(b)は 18 日間行った。

実験結果．水溶液の pH は水路上流端では(a)、(b)共に 6.1~6.5、下流端では(a): 6.7~6.8、(b): 6.3~6.6 であった。電気伝導度は、(a)上流: 1400~1800 μS 、下流: 1200~1400 μS 、(b)上流: 1300~1400 μS 、下流: 1100~1300 μS であった。温度は、(a)上流: 53 前後、下流: 48 前後でおよそ 5 の温度差、(b)では上流: 45 前後、下流: 42 前後でおよそ 3 度の温度差があった。

(a)、(b)いずれの実験でも水路底に白色の堆積物が析出した。堆積物の表面には二酸化炭素の脱ガスによると思われる無数の細かい穴が見られた(図 4)。(a)では波長約 20 cm、波高 2.5mm 程度の段差が周期的に見られた(図 5)。(b)では水路底に白い堆積は見られたものの、(a)と比べて層が薄く、水路底面の凹凸が小さかった。レーザー変位計測定による表面形状を比較すると、ステップ様の凸部分が上流方向へ徐々に発達している。また、実験時間を重ねるごとに白い堆積物の層が徐々に厚くなっている事がわかった。

水路底に析出した堆積物について X 線粉末回折を行った結果、方解石(CaCO_3)の結晶である事がわかった。また電子顕微鏡を用いて観察すると(a)のほうが(b)より大きな結晶が形成されていることが確認できた(図 6)。

まとめと課題 . このように(a) , (b)共に方解石の析出が起こり , ステップ形成の初期段階とみられる凹凸が認められた . (b)は流量が多い分 , 水路内を通過する間の温度変化が(a)に比べて少なく , 析出速度が小さくなったと考えられる . しかしながら , 顕著なステップ地形を形成するにはもう少し時間を要すると思われる . また , さらに流量や水路勾配を変えて方解石の析出速度やステップ形成の有無を調べる必要がある .



図 4 実験(a)7 日目 , 上流から 110cm の水路底写真

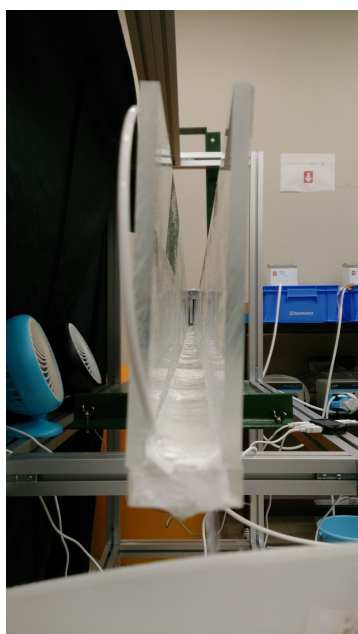


図 5 実験(a)6 日目 , 下流端から撮影 . 周期的なステップが形成されていることがわかる .

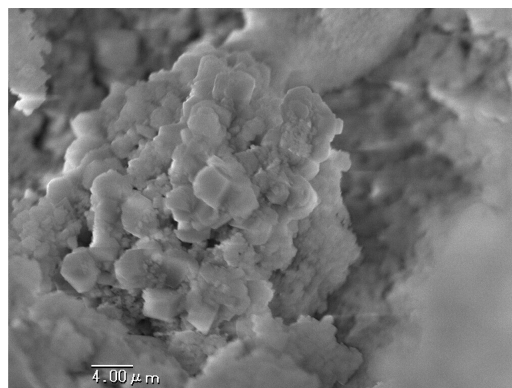


図 6 実験(a)の水路の上流端より 101-120cm 付近の石灰質堆積物の電子顕微鏡写真 . スケールは $4.00\mu\text{m}$. 方解石の結晶が形成されている事がわかる .

平成 26 年度の実験 .

実験目的 . できる限り実験操作を単純化して純粋な方解石の化学的な析出を起こすこと , また溶液中のカルシウムイオン濃度を正確にモニターして地形形成との関係を調べられるような装置の開発を目指した .

実験方法 . 実験は大阪工業大学情報科学部の地球環境研究室で行った . 水路は長さ 200 cm , 幅 6 cm , 高さ 5 cm で , 底に石灰岩の石材タイル(長さ 40 cm , 幅 6 cm , 厚さ 3 cm)を 5 枚繋げて張り付けた (水路底面に粗度をつける事と , 炭酸カルシウムの結晶がつきやすくなるようにするため) . これをアルミポールで作成した枠に勾配 2° で取り付けた .

溶液の作成・循環には , 200 L の密閉可能なタンク 6 つと炭酸ガスポンベを使用した . 上下流で 3 つずつタンクを配置し , 上流ではタンク 1 つあたり 160 L の蒸留水と 100 g の CaCO_3 粉末を入れて炭酸ガスを供給し , 水中ポンプで攪拌した . タンクに炭酸ガスポンベから二酸化炭素を送り続け , タンク内の空気の二酸化炭素分圧をほぼ 100% にした . この状態で 1 時間ほど経つと , 溶液の pH が下がり , 投入した炭酸カルシウムの粉末が溶けた . この状態で送液ポンプを用いて水路内へと溶液を導き水路に通水した .

この実験では通水中に滴定で溶液中のカルシウムイオン濃度を求められるようにし

た。滴定は一般的な中和滴定と同じ方法である。溶液の採取には 45 μm のメンブレンフィルターをつけたシリンダーを使用し、溶け残りの CaCO₃ 粉末を採取しないようにした。滴定の結果からグラン法を用いてカルシウムイオン濃度を求める。

平均流量 11.0 cm³/s で、178 時間通水した。この間、水路上端・下端の 2 点で pH、電気伝導度、温度を求め、上流端の溶液について滴定を行った。その他、レーザー変位計を用いて実験前後の石灰岩プレート表面の変化を測定した。

実験結果。溶液の pH は上流: 6.1 ~ 6.5, 下流: 6.3 ~ 7.1, 電気伝導度は上流: 平均 933.84 μS, 下流: 平均 927.85 μS, 水温は上流: 平均 24.4, 下流: 平均 26.8 でおおよそ 2 の温度差があった。室温は 30 前後に保った。水路上の溶液の平均水深は 0.70 mm, 平均幅は 43.28 mm, 平均流量は 11.0 cm³/s でフルード数: 4.38 であった。

上記の方法で 178 時間通水した結果、水路底面の石灰岩タイルの上に白い膜状に石灰質堆積物が堆積した。

まとめと課題。この実験では溶かす物質や条件をより単純化し、溶液中のカルシウムイオン濃度を評価できる様になった。しかし、この方法では方解石の析出速度が遅く、目に見える地形の形成は難しい。今後はこの溶液に溶かし込む物質の検討、またタンク内の二酸化炭素の圧力をさらに上げるなどして、ステップ形成の条件を探りたい。

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)

[学会発表](計 4 件)

Shitanishi, T., Yokokawa, M., Kim, W., Izumi, N., Parker G., Experiments on the formation carbonate “cyclic steps” as a model of travertine

step-pool morphology. European Geoscience Union General Assembly 2014, 28 April, 2014, Wien, Austria.

泉 典洋・Parker, G., 生物の働きによって形成される石灰岩ダム地形。日本堆積学会 2014 年山口大会。2014 年 3 月 15 日。山口大学吉田キャンパス大学会館(山口県山口市)。

下西達也・横川美和・Kim, W.・泉 典洋・Parker, G., 石灰質堆積物によるステップ地形形成に関する実験的研究。日本堆積学会 2014 年山口大会。2014 年 3 月 15 日。山口大学吉田キャンパス大学会館(山口県山口市)。

Norihiro Izumi and Gary Parker, Morphodynamics of Travertine Dam/Waterfall Growth due to the Interaction of Biological Activity, Water Flow and Limestone Emplacement, AGU 2012 Fall Meeting, 3-7 December, 2012, San Francisco, USA.

[その他]

ホームページ(泉 典洋)

<http://earth-fe.eng.hokudai.ac.jp/index.html>

6. 研究組織

(1)研究代表者

泉 典洋(IZUMI, Norihiro)
北海道大学・工学研究院・教授
研究者番号: 10260530

(2)研究分担者

横川 美和(YOKOKAWA, Miwa)
大阪工業大学・情報科学部・教授
研究者番号: 30240188

(3)研究協力者

PARKER, G.
イリノイ大学アーバナシャンペーン校・教授

KIM, W.

テキサス大学オースチン校・助教