

令和 2 年 6 月 10 日現在

機関番号：37501

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2017～2019

課題番号：17K01228

研究課題名(和文) 宇宙線生成核種を用いた渓流域における土砂災害ハザードの時・空間的な評価・予測

研究課題名(英文) Evaluation and prediction of sediment-related disaster hazards in mountain stream areas using cosmogenic nuclides

研究代表者

池見 洋明 (Ikemi, Hiro)

日本文理大学・工学部・准教授

研究者番号：90380576

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,300,000円

研究成果の概要(和文)：本研究は、渓流域における不安定土砂の分布と土砂移動メカニズムを解明し、一般化して、土砂災害ハザード(土砂災害を引き起こす自然現象)を時・空間的に評価・予測する手法を確立することを目的に、福岡県乙石川流域において地形解析、シリカフラックス解析を実施した。当初計画の斜面安定解析、宇宙線生成核種 ^{10}Be の分析については継続中である。これまでの結果、山地溪流のシリカフラックス解析は、地形解析との組み合わせにより、渓流域における土砂状況を評価する指標として有効であることが明らかとなった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究で提案する斜面の土砂分布の把握手法は、これまで困難であった自然斜面の安定解析の実現とその精度を向上させる。斜面で生じる崩壊は、土層など表層が移動して生じるものが多く、これまで様々な物理モデルが提案されてきた。しかし、重要なパラメータである斜面の土砂分布は不明であることが多く、安定解析では、一様な値として仮定される場合が一般的であった。本研究は、その土砂の空間分布を合理的に求める方法の可能性を示している。また、その結果として、渓流域の土砂災害ハザードの規模や頻度を明らかにできれば、溪流の下流に位置する地域の合理的な防災対策を支援するが可能になる。

研究成果の概要(英文)：The goals of our study is to elucidate the distribution of unstable sediments, and to generalize the mechanism of sediment movement in mountain streams, and to establish a method for temporal and spatial evaluation and prediction of sediment hazards that cause sediment disasters. For this purpose, topographic analysis and silica flux analysis were carried out in the Otoishi River basin, Fukuoka Prefecture. The slope stability analysis and analysis of ^{10}Be , which is the cosmic ray-producing nuclide, are still ongoing. As a result, it has been clarified that the silica flux analysis of mountain stream is effective as an index to evaluate the sediment condition in the mountain stream in combination with topographic analysis.

研究分野：応用地質学

キーワード：地形解析 シリカフラックス 九州北部豪雨災害

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

渓流域の土砂災害ハザード(土砂災害を引き起こす自然現象)を評価・予測するためには、不安定土砂や地下水の時空間的な把握が必要となる。これまで申請者らは、数値モデルによる地形解析と水文観測から、山地流域(渓流域)を構成する斜面群の地形と河川流量との間に定量的な関係を見出し、その関係が空間的な流域の土砂分布を示していることを明らかにした(Ikemi et al., 2014)。渓流域の土砂の不安定化と土砂移動は、河川へ大量の土砂を供給し、下流では、その堆積によって、河床上昇や天然ダムを発生させたり、洪水や土石流を起こしたりする原因となる。しかし、渓流域の土砂の空間的、時間的な移動メカニズムは、同じ地質であっても場所ごとに異なり、土砂災害ハザードの評価・予測を困難なものにしている(図-1)。



図-1 渓流により土砂移動メカニズムは異なる(平成 26 年広島県土砂災害の空中写真; 国土地理院 HP より引用。多くの谷で土石流が発生している中で、同じ豪雨を経験したが、写真左の線で囲んだ谷では、空中から土砂の流下が確認できない。)

また申請者らは、渓流域の土砂移動を時間的に検討する指標として、宇宙線生成核種のベリリウム ^{10}Be に着目し、短期的な土砂移動との関連について研究を開始した(池見ほか, 日本応用地質学会講演論文集, 2015)。1990 年代以降、河床堆積物を対象として、 ^{10}Be の測定が行われ、流域規模の侵食速度の推定が行われるようになってきた(Portenga & Bierman, *GSA Today*, 21, 4-10, 2011)。この ^{10}Be による年代測定は先進的な技術であり、国内で測定できる機関は 2 カ所だけである。

このような背景のもと本研究計画では、数値モデルによる地形解析、水文観測、斜面安定解析技術に加え、ベリリウム同位体 (^{10}Be) を用いた新しい技術を複合させて、渓流域の不安定土砂の分布土砂災害ハザードについて評価し、一般化して、時間・空間的な土砂災害ハザードの予測(時間、場所、規模)の実現を目的とする。なお申請者らは、これまで研究計画を進めていく上で予備的に次の結果を得ている。

1. 自然斜面を傾斜方向と傾斜角で区分する単位斜面の作成手法と 3 次元での斜面安定解析手法を開発した (Jia, Ikemi et al., 2011; Jia, Mitani et al., 2014)。
2. 地形形成過程において斜面プロセスと河川プロセスを定義し、その 2 つの土砂フラックスで構成する地形形成の数値モデルを提案した (池見ほか, 2012)。
3. 航空機レーザ測量データから森林域において、5m グリッドの詳細なデジタル標高モデル (DEM) を作成する手法を開発した (池見ほか, 2012)。
4. 提案する数値モデルによる解析結果は、流域の植生被覆率、河川流量、河川水のシリカ濃度と相関を示すことを明らかにした (池見ほか, 2012; Ikemi et al., 2013; Ikemi et al., 2014)。
5. 河床堆積物の ^{10}Be 含有量は、人為的影響など比較的短期間の土砂移動を検知していることを明らかにした (池見ほか, 2015)。

2. 研究の目的

本研究計画では数値モデルによる地形解析、地形・水文調査、3 次元斜面安定解析技術に加え、 ^{10}Be を用いた新しい年代測定技術を複合させ、渓流域の不安定土砂の分布と土砂災害ハザードについて、時間・空間的な評価・予測技術の確立を目的とする。この目的を達成するため、本研究期間内では当初、次のことを明らかにすることとしていた。

1. 地質・地形が多様で、様々な斜面を検討できる熊本県菊池川流域を対象として、航空機レーザ測量、衛星画像、地質ボーリング情報などを収集し、実証的な解析データベースを構築する。
2. データベースをもとに調査流域全域で数値モデルによる地形解析を行う。その結果から 1

km² 程度で分割したサブ流域を系統的に整理し、多様な斜面をもつモデル流域を複数選定する。

3. モデル流域において、地形・地質の現地調査、溪流流量の水文解析、地下水を評価するシリカ分析および地形解析結果と総合して、モデル流域の山地斜面の土砂分布を空間的に把握する。
4. 空間的に把握した土砂分布から、分布型水文モデルと連成させ、降雨を考慮した三次元斜面安定解析をおこなって、不安定な土砂分布を求める。
5. モデル流域において、斜面物質および河床堆積物のベリリウム同位体 (¹⁰Be) を測定し、溪流の土砂の起源や時間的な移動履歴を明らかにして、渓流域の地形と土砂移動メカニズムの関係について一般化し、土砂災害ハザードの評価・予測技術の確立へと展開する。

なお 2016 年に発生した熊本地震の影響や 2017 年の九州北部豪雨などの災害発生したこと、当初予定していた調査地域へのアクセスが困難となったこと、また研究代表者が他大学に移動したこと等の理由によって、調査地域を熊本県から福岡県の花こう岩地域に変更した。これにより、使用する試料やデータを新たに追加する必要も生じ、研究期間内に研究を予定通り完了することはできていない。

3. 研究の方法

本研究では、数値モデルによる地形解析、水文観測、斜面安定解析技術に加え、宇宙線生成核種 ¹⁰Be を用いた新しい技術を複合させて、渓流域における不安定土砂の分布と移動メカニズムを明らかにし、一般化して、土砂災害ハザードの時・空間的な評価・予測技術を実現することを目的とした。そのため、当初は以下のようなフローで研究計画を作成したが、前記したとおり全てを完了できていない。

なお、全体総括および流域地形の数値解析で池見（日本文理大学）、斜面の安定解析では研究分担者の三谷（九大）が主に担当した。水文・地形の現地調査は連携研究者の黒木（福教大）が担当した。また、本研究の一部は学位研究として、研究協力者の中西、吉田（九大・大学院生）が担当した。

3-1 情報収集と解析用データベースの構築

前記した理由により、調査対象地域は熊本県菊池川流域から福岡県の七寺川、宇美川など花こう岩からなる流域に変更し、必要な情報を収集し、データベースを構築する。データは、航空機レーザ測量データ、1960 年頃以降の時系列の空中写真(国土地理院)や大縮尺地形図(自治体)、ランドサット画像などの近赤外線を含む衛星画像、地質ボーリングである。また、収集した航空機レーザ測量データをもとに申請者らが提案する手法により高精度デジタル標高モデル(DEM)を作成した。これらを整理して、地形解析用のデータベースを構築する。

3-2 地形プロセススペースの数値モデルを用いた地形解析

データベースをもとに調査流域全域で数値モデルによる地形解析を行い、流域の地形的特徴を示す地形勾配と流域面積の分布図や地形量を対象地域で求める。解析に使用した数値モデルは、地形を形成するプロセスが地殻運動、斜面変動、河川作用から構成されるとし、それぞれの現象で発生する土砂フラックス¹の質量は保存されるとして表現したものである。このモデルから、対象とする流域がこれまでどのような地形プロセスを経験したかを解析できる。解析に用いる式は次の通りである（**Ikemi et al.**, 2014）。

$$\log \frac{\nabla^2 z - \nabla^2 z_{\text{尾根}}}{\nabla z^n} = \log \left(\frac{K}{D} \cdot \alpha^m \right) + m \log A$$

ここで m , n (無次元)、 K/D ($M^{-3m-1}T^m$)、 (MT^{-1}) は定数となる。式(1)は、流域に分布する斜面勾配 z (M/M) と尾根を最小値とした曲率 $[z - z_{\text{尾根}}] (M^{-1})$ の比 (以下、勾配曲率比) と流域面積の関係が、両対数図で、線形になることを示している。 m , n , K/D 値は地質や気候に影響されるパラメータで、同じ地質・地域であれば同様の値を示す。一方、 A は河川流量に関係し、植生や土砂量に影響され、サブ流域ごとに変化する。この式(1)を用いて、流域の DEM から勾配曲率比と流域面積 A (M^2) を軸とした両対数の散布図を描き、式(1)を用いた回帰分析から m , n , K/D 値と平均的な A 値を求めた。次に、サブ流域ごとに DEM を分割して、再度分析を行って、サブ流域の特徴である地形量 A 値を算出する。

3-3 地形・水文調査と流量解析による渓流域の土砂分布の空間的な把握

対象流域において、定期的な流量観測と水位の連続観測、河川水の定期的なシリカ分析、分布型水文モデルによる水文解析および地形解析を行って、シリカフラックスから斜面の土砂分布の状況を把握する。一般に、河川の流量や化学組成 (特にシリカ濃度) は、流域に分布する土砂量や地下水に影響を受ける。また、これまでの研究から、地形量 A 値は、渓流域のハイドログ

ラフ、比流量、シリカ濃度と関係があることがわかっている。これらの関係をもとに、水文・地形の現地調査、分布型水文モデルによる水文解析、数値モデルによる地形解析を行って流域の斜面に分布する土砂量や地下水の動きを検討する。

3-4 降雨を考慮した3次元斜面安定解析の開発と不安定な土砂分布の把握

構築したデータベースおよび土砂分布をもとに、対象流域を斜面ユニット4に分割し、申請者らが開発した3次元斜面安定解析をおこなって、不安定な土砂の分布を求める。この解析手法は、既往の3次元安定計算式(Hovland, ASCE, 103, 971-987, 1977など)をベースに、斜面ユニットを分析単位とし複雑な地形を有する自然斜面から不安定な斜面の「位置」、「規模」を検出できる。本研究では、この手法に加え、降雨の影響として、分布型水文モデルを連成させる。また、降雨浸透で飽和状態となり、崩壊した土砂を非圧縮粘性流体の運動として計算させ、土石流などの土砂の発生量も評価する。

3-5 宇宙線生成核種 ^{10}Be を用いた時空間的な土砂の移動メカニズムの解明

斜面物質および河床堆積物のサンプリング、前処理およびベリリウム同位体を測定し、流域ごとの土砂生産量の違い、河床堆積物の起源、土砂の移動が、崩壊によるのか、重力によるクリープなのかなど、その移動履歴を時・空間的に明らかにする。ベリリウム同位体 ^{10}Be は、半減期138万年の放射性同位体、崩壊によってホウ素 ^{10}B となって安定する。この ^{10}Be は宇宙線の影響により岩石表面や表層土に生成され、 ^{10}Be 量の変化から岩石の侵食率などを推定することができる(兼岡, 年代測定概論, 1998)。河床堆積物の ^{10}Be 含有量は、上流域から供給される土砂の値となる。斜面崩壊により土砂が供給された場合は、地下深部の土砂が混入する割合が大きくなり、結果として、堆積物の ^{10}Be 含有量は小さくなる。この関係から、流域の斜面や河床堆積物の ^{10}Be 含有量を分析し、河床堆積物の起源や時間的な移動履歴が解明できる。

4. 研究成果

当初の計画では、地質的に多様性のある熊本県菊池川流域を対象地域としていたが、熊本地震の影響が想定以上に大きかったこと、研究期間中に、九州北部豪雨災害が発生し、熊本、福岡の斜面や河床状況が大きく変化したことから対象流域を福岡県の花こう岩分布域に変更した。これにより、解析や分析のためのデータ整備、試料作成に時間がかかってしまい、研究方法の3-4、3-5に関しては現段階で公表できる結果は得ていない。いずれ公表する予定であるが、研究期間内に完了した研究方法の3-1から3-3の乙石川流域における結果について以下に報告する。

乙石川流域の地形解析の結果、左岸の地形ほど流域面積と地形勾配との相関が強く、より流水の影響が強い地形を呈しているとした。また流域全体におけるD/Kと崩壊面積率との相関分析では、相関係数R2で0.13程度あるが、崩壊面積率が5%を超える流域に限定すると相関係数R2は0.27に上昇すると報告した。この結果は、乙石川流域では左岸と右岸で地形が異なり、地形と崩壊面積に定量的な関係があることを示している。

観察結果から、乙石川沿いの谷底平野で堆積した堆積物は、山地斜面の崩壊で初生的に発生した土石ではなく、多くが流水によって運ばれた砂と礫であった。また河岸が浸食された箇所では、過去の土石流と考えられる堆積物が多く確認できた。これらの結果は、乙石川流域の各サブ流域には、今回発生した土砂に加え、過去に発生した土砂が蓄積されており、流水により排出しつづけていることを示唆している。

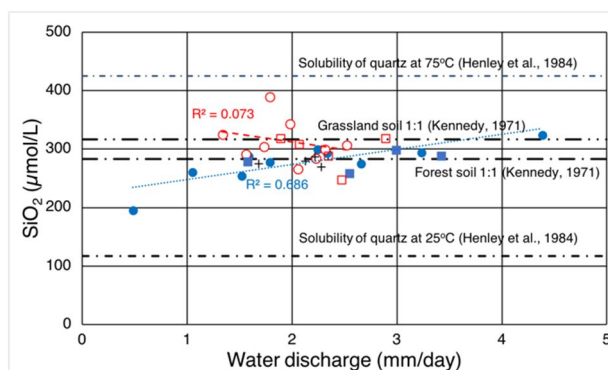


図-2 支流および本流の流量と溶存シリカ濃度の関係(図-3,4の記号は、右岸が白抜き、左岸は塗り潰しで示し、11月の測定データは四角、12月は円で表している)

図-2で示したシリカ濃度の変化幅は、多様な水の混合で説明できる。同図には水-岩石反応や土壌からの溶出で想定される溶存シリカ濃度を示している。水-岩石反応でのシリカの溶出は温度

に依存し、25 で石英と水が化学的な平衡状態にある場合、溶存シリカ濃度は $200 \mu\text{mol/L}$ 以下を示す。75 で石英と平衡状態になると $400 \mu\text{mol/L}$ 以上になる。25 は一般的な地下水、75 は温泉水が想定される。一方、低い温度でも土壌からは容易にシリカが溶出し、 $300 \mu\text{mol/L}$ 程度の値を示すことが報告されている。山地斜面表層を流れる中間流的な地下水がこれに相当すると考えられる。

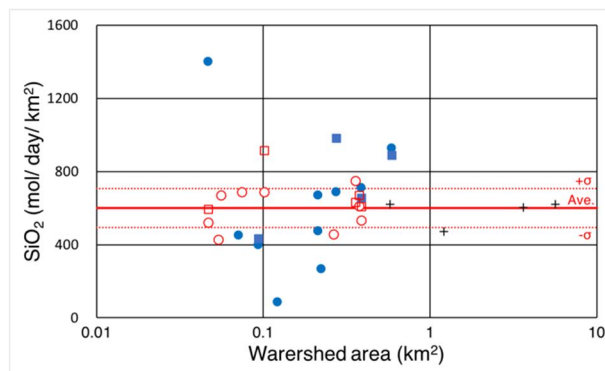


図-3 右・左支流および本流の流域面積とシリカフラックスの関係

図-3のシリカフラックスの変動は、これら多様な水の流れや混合状況を示していると考えられる。右岸では、温泉水などの混合により、ややシリカ濃度の高い河川水が観測されたが、概ねシリカフラックスは安定しており、河川水を形成する地下水や中間流の混合、流れが安定的に行われていると考えられる。一方、左岸は、各サブ流域での流れ、混合具合が多様であることを示している。

左岸は、崩壊面積率が高く、地形も流水の影響を強く受けた地形を呈している。低いシリカ濃度の河川水が確認され、シリカフラックスが大きく変動する。これらの結果から、仮説として、左岸では土砂移動が頻繁に発生していることが考えられる。頻繁な土砂移動の結果、各サブ流域の河道の土砂分布等が不均質になり、流量が少なく、地下水流が主体的となる河川水から、斜面や河道に土砂が多く、そこを流れる中間流が主体的となる河川まで、様々な状況が生じているものと推定できる。

以上の結果、乙石川流域では、土石流堆積物があまり確認できず、多くの堆積物は、流水によって二次的に移動した砂礫であることが明らかとなった。水文調査では、溶存シリカ濃度および河川流量において、左岸で幅広いレンジを確認した。乙石川流域での左岸と右岸の地形の違いと崩壊との関係を考慮すると、右岸よりも左岸からの単位面積あたりの土砂供給量が多かったことが推定された。山地溪流のシリカフラックスは、地形解析との組み合わせにより、渓流域における土砂状況を評価する指標として有効であることが示唆される。

以上

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計3件（うち査読付論文 1件／うち国際共著 0件／うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Nakanishi Ryunosuke, Baba Akira, Tsuyama Takahiro, Ikemi Hiro, Mitani Yasuhiro	4. 巻 9
2. 論文標題 Examination of Sediment Dynamics Based on the Distribution of Silica Fluxes and Flood Sediments in the Otoishi River Related to the Northern Kyushu Heavy Rain Disaster, July 2017	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Geosciences	6. 最初と最後の頁 75～75
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.3390/geosciences9020075	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 -

1. 著者名 池見洋明, 黒木貴一	4. 巻 48
2. 論文標題 地形プロセス解析と水文地質調査による山地流域の土砂生産量把握に向けた基礎的研究	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 日本文理大学紀要	6. 最初と最後の頁 19-28
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 -

1. 著者名 Ikemi Hiroaki	4. 巻 87
2. 論文標題 Geologically constrained changes to landforms caused by human activities in the 20th century: A case study from Fukuoka Prefecture, Japan	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Applied Geography	6. 最初と最後の頁 115～126
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.apgeog.2017.08.001	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 -

〔学会発表〕 計3件（うち招待講演 0件／うち国際学会 0件）

1. 発表者名 池見洋明, 津山貴裕
2. 発表標題 杷木断層に近接する乙石川支流のシリカフラックスと河川堆積物の分布
3. 学会等名 日本応用地質学会研究発表会講演論文集
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Hiro Ikemi, Ryunosuke Nakanishi, Akira Baba, Yuuki Okajima, and Yasuhiro Mitani
2. 発表標題 Process-base topographical and geochemical approaches to rainfall-induced landslides adjacent to tectonic faults
3. 学会等名 IAEG 2018
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 池見 洋明・中西 隆之介・馬場 亮・肘井 敬明・岡島 裕樹・三谷 泰浩
2. 発表標題 平成29年九州北部豪雨災害による乙石川流域の洪水堆積物とシリカフラックスの分布
3. 学会等名 第9回土砂災害に関するシンポジウム論文集
4. 発表年 2018年

〔図書〕 計1件

1. 著者名 池見洋明（分担執筆）	4. 発行年 2018年
2. 出版社 （一社）日本応用地質学会 / 九州応用地質学会	5. 総ページ数 190
3. 書名 2017年九州北部豪雨災害調査団報告書	

〔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	三谷 泰浩 (Mitani Yasuhiro) (20301343)	九州大学・工学研究院・教授 (17102)	

6. 研究組織（つづき）

	氏名 (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究協力者	黒木 貴一 (Kuroki Takahito)	関西大学・文学部・教授 (34416)	