

令和 4 年 10 月 31 日現在

機関番号：15101

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2016～2020

課題番号：16K01218

研究課題名(和文) Improving runoff estimation in a monsoon climatic region of Ethiopia

研究課題名(英文) Improving runoff estimation in a monsoon climatic region of Ethiopia

研究代表者

Haregeweyn N (Haregeweyn, N)

鳥取大学・国際乾燥地研究教育機構・特命教授

研究者番号：30754692

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,700,000円

研究成果の概要(和文)：青ナイル川上流域での3つの対照的な流域を研究対象とし、土地管理の大規模な見直しを行い、以下のことが分かった。1)主な流出メカニズムは飽和過剰であるが、その範囲は土地利用の種類で異なる。2)アカシア植生下の土地は下草が少なく土壌表面が圧縮されているため土壌飢餓状態の表面流出が多く、ガリー侵食を引き起こす可能性がある。3)2019年に植生が改善し地下水の涵養が促進されグダール地帯での地下水によるガリー侵食の原因となった。4)UBNBでは場所によって「人が増えれば木も増える」、「人が増えれば侵食も増える」という傾向が見られる。5)世界規模での侵食防止活動は技術的、社会的や政策的な障壁に直面している。

研究成果の学術的意義や社会的意義

今回の研究は、既存または新規の水文学、侵食モデルにおいてそれぞれ飽和過剰流出と地下プロセスを組み込むためにさらなる研究の必要性を示唆している。我々の研究は5つ以上の国際会議といくつかの国内会議で発表された。

研究成果の概要(英文)：Three contrasting watersheds found the Upper Blue Nile Basin (UBNB) were the focus of the studies. We also conducted global-scale review on land management.

The key findings were: (1) the dominant runoff generation mechanisms of the watersheds is saturation excess but its extent varies with land use type; (2) the land under acacia vegetation is characterized by low undergrowth and compacted soil surface that resulted in high sediment starved surface runoff, which could have huge potential to cause gully incision; (3) improved vegetation in 2019 has enhanced groundwater recharge that contributed for subsurface-water triggered gully erosion in Guder site; (4) the UBNB is experiencing a general trend both towards “more people more trees” or “more people more erosion” depending on the location and (5) global erosion-control efforts face a host of barriers related to technical, social and policy.

研究分野：地理学

キーワード：流出メカニズム 土壌水分 水文学的応答 土地利用の変化 土壌侵食 ガリー頭部の後退

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

土地利用や気候変動などの環境変化に対する、流出や土壌侵食などの景観応答は知られていないが、その複合的作用は複雑で明らかでない。その結果、景観応答の説明要因を特定することができておらず、適切な流域管理手法を選定することが難しい。エチオピアの高地では、土地利用や土地管理、そして気候の変動が大きいため、流出や土壌侵食などの景観応答に影響を与えている。現在と過去の環境において、気候と人間活動は、エチオピアの景観に人の増加に伴い植林が増える状況や、人による耕作の増加により侵食が進行する状況と対照的な結果をもたらし、それは標高が異なる農業生態系によって大きく異なる。

特にエチオピアの青ナイル川上流域で最も懸念される環境応答である土砂流出は、安定的な食糧・水・エネルギー供給を脅かしている。流出メカニズムの種類は、表面流出、地すべり、拡散、浸透などの土壌侵食の形態に影響を与える。したがって、水資源を最適に利用するためには、青ナイル川上流域における水文プロセスの正確なモデルの開発が必要である。しかし、一般的な水文モデルは温帯流域の典型例である浸透余剰を主な流出プロセスとして推定を行うため、飽和超過型のメカニズムが支配的であるエチオピアのような熱帯流域では適用が難しい。そのため、本研究では熱帯流域に適した水文モデルの開発への貢献を目指す。さらに、本研究の対象流域のようにガリ侵食が進行している流域においては、土壌侵食を防止し安定化させるために地点ごとの景観に適した侵食防止策が必要であることから、流域全体の侵食に対するガリ侵食の寄与を定量することが重要である。

2. 研究の目的

熱帯流域における流出メカニズムを研究し、土地利用と気候変動の相互作用を青ナイル川上流域における水収支の分析と統合することで、人間活動、気候変動、景観の複雑な相互作用に関する将来予測を目指す。したがって、本研究では、フィールド調査、空間分析及びモデルシミュレーションを統合することで、エチオピアの熱帯流域における流出量については土砂生産量の推定手法の確立に貢献することを目的とし、以下の研究に取り組んだ。

- (1) 河川流域における土壌侵食リスクの包括的評価
- (2) 土地劣化の長期的な動態と対策
- (3) ガリ侵食の包括的特性評価、モニタリング、モデリング

3. 研究の方法

- (1) 河川流域における土壌侵食リスクの包括的評価

本研究で用いた方法論的枠組みは、空間的に明示的な(ピクセルおよびゾーンベースの)アプローチをエチオピアの青ナイル上流域を対象に実施する最初の試みであった。また、シート侵食、リル侵食、ガリ侵食、土砂生産量などの統合的なリスク評価を行い、河川流域規模に応じた様々な管理オプションの効果を分析した。GIS技術を用いて、地形、降水量、土壌、土地利用、人為的要因などに基づいて、流域を水文学的に均質な約30m×30mのセルに離散化した。セル毎に、シート侵食、リル侵食、ガリ侵食、及び土砂生産量を計算した。

- (2) 土地劣化の長期的な動態と対策

エチオピア北西部・青ナイル上流域の3つの生態水文環境にある3つの対照的な流域を事例として、土地劣化の速度、要因、可能な対策を調査した。研究対象流域は、流域の主要な環境であるグダール(高地)、アバガリマ(中間地)、ディバテ(低地)において代表的な小流域を選定した。過去35年間(1982年~2017年)の土地利用・被覆(LULC)とガリ動態、ペアとなる流域(土壌・水の保全対策導入流域及び対策無しの流域をペアとした)の人間活動との関連性を分析しました。現地観測、リモートセンシングデータ(航空写真[1:50,000規模]および超高解像度[0.5-3.2m]の衛星画像)および地理情報システムを統合して解析した。

- (3) ガリ侵食の包括的特性評価、モニタリング、モデリング

エチオピアの青ナイル上流域の3つの農業生態系(高地[グダール]、中間地[アバガリマ]、低地[ディバテ])で見られるガリの形態的特徴、長期的な動態、潜在的な制御要因について調査した。3つのサイトに分布する94カ所(アバガリマ:33、グダール:36、ディバテ:25)のガリについて、2017年と2018年にフィールド調査を行い形態的な特性を評価した。この特性評価に加えて、過去約60年間のガリの発生状況をリモートセンシングデータを用いて評価した。さらに、2006年~2017年の間に発生した56の進行性ガリ谷頭について、ガリ谷頭の後退と土砂生産量を定量した。

4. 研究成果

(1) 河川流域における土壌侵食リスクの包括的評価

熱帯流域における土地利用形態ごとの支配的な流出プロセスを推定するために、135の降雨イベントの強度と、3つの土地利用タイプ（耕作地、放牧地、低木地）における土壌浸透率を比較した結果、81%、80%、55%の降雨強度が、定常浸透率（劣化した低木地、放牧地、耕作地のそれぞれ18.5mm/hr、16.2mm/hr、9.2mm/hr）を大幅に下回っていることが明らかになった（**図1**）。このことから、流域の主な流出メカニズムは、劣化した低木地及び放牧地では約80%、耕作地では55%を占める飽和含水量の超過によることが示唆された。温帯流域において典型的である

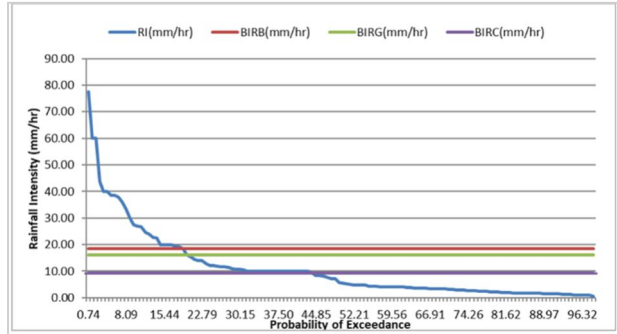


図1. イベントベースの降雨強度と異なる土地利用タイプにおける土壌浸透率（RI:降雨強度、BIRB:低木地浸透率、BIRG:放牧地浸透率、BIRC:耕作地浸透率）

浸透余剰を主な流出プロセスとした多くの水文モデルでは、このプロセスを考慮してない。このことは、耕作地と放牧地における地下水位の測定値と降雨量の関係からも裏付けられる。降雨量が変化するたびに、多少の時間差はあるものの、すぐに地下水位が変化していることから、流域の地下水位は地表近くにあり、飽和し過剰な流出が発生する傾向にあることがわかる。

このような生態水文環境であるエチオピアの青ナイル上流域を対象に、土壌侵食の深刻度とそれに対応する侵食率（t/ha/yr）を算出した。その結果、この流域では、平均で27.5 t/ha/yrの土壌流亡が発生し、総土壌流亡量は約1,000万トンであった。流域全体の侵食率は473 Mt/yrであり、そのうち少なくとも10%はガリ侵食起因で、26.7%はエチオピアから下流域へ流亡したものである。因子分析の結果、農業生態系の変遷（平均因子得点 = 1.32）と傾斜の変動（1.28）が、この高い空間的変動性に強く関与する因子であった。流域面積の約39%では、土壌侵食リスクが深刻または非常に深刻なレベル（> 30 t/ha/yr）になっており、人口密度との強い相関関係がみられた。さらに7つの支流を特定し、これら流域の土壌侵食リスク（極めて低いレベルから非常に深刻なレベル）に基づき優先的な介入が必要な地域の特定が可能になると考えられる（**図2**）。

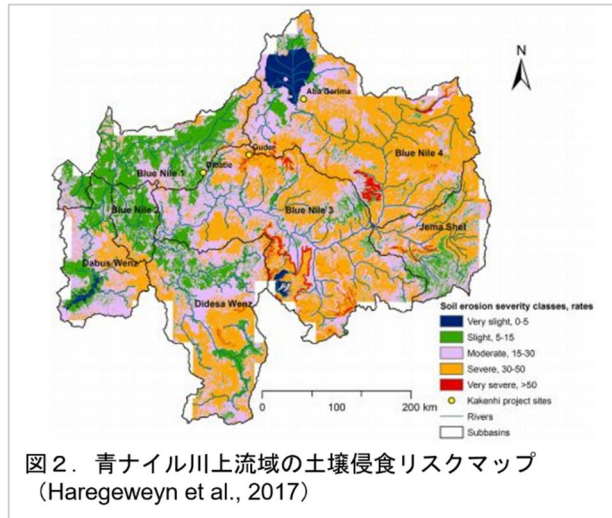


図2. 青ナイル川上流域の土壌侵食リスクマップ (Haregeweyn et al., 2017)

(2) 土地劣化の長期的な動態と対策

1982年から2017年の間に、森林地、低木地、放牧地はそれぞれ、グダールで約76%、58%、30%、アバガリマで54%、63%、52%、ディバテで69%、45%、43%減少した（**図3**）。同時に、グダール、アバガリマ、ディバテでは、耕作地がそれぞれ約38%、97%、492%増加した。一方、2012年から2017年の間に、グダール流域では植林面積が241%増加した一方、耕作地は同期間に32%減少した。1982年から2017年にかけて、グダール（36.9 m/year）とアバガリマ（33.6 m/year）のガリの伸長率は、ディバテ（17.8 m/year）の約2倍であった。また、グダール、アバガリマ、ディバテのガリ密度はそれぞれ5.9 m/ha、5.4 m/ha、3.7 m/haであった。グダールとアバガリマで観測された高い密度は、これらのサイトでの耕作および人間の居住の長い歴史を反映していると考えられる。一方、ディバテで農業活動が広まったのは、1980年代に国家の再定住プログラムが実施されてからで

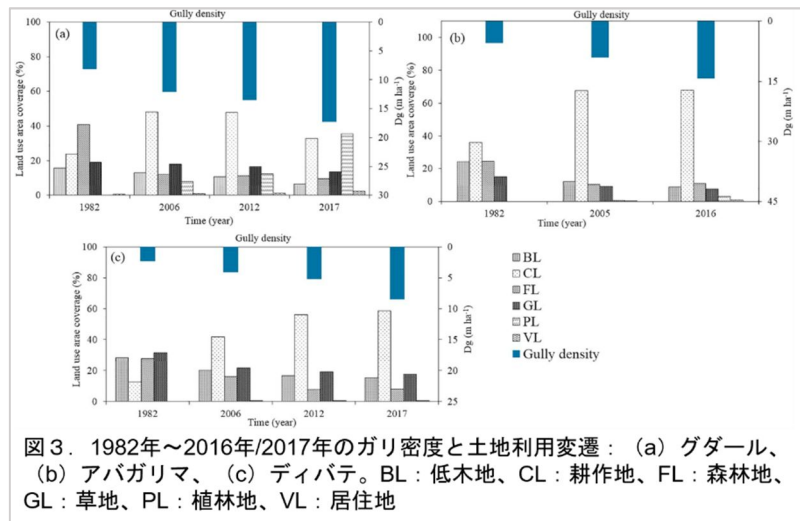


図3. 1982年～2016年/2017年のガリ密度と土地利用変遷：(a) グダール、(b) アバガリマ、(c) ディバテ。BL：低木地、CL：耕作地、FL：森林地、GL：草地、PL：植林地、VL：居住地

ある。人間活動による環境への悪影響は、近年、特にグダールでは、従来の一年生作物から換金性の高い樹木を利用した生業への移行に伴い、かつてないほどの勢いで反転している。同様に、6つの流域すべてでガリの密度は時間の経過とともに増加する傾向にあったが、土壌・水の保全対策が導入された3つの流域では、対策が行われなかった流域に比べて増加速度の低下がみられた。全体的な傾向として、流域では地域により、人の増加に伴い植林が増える状況や、人による耕作の増加により侵食が進行する状況という対極的な状況が見られた。

(3) ガリ侵食の包括的特性評価、モニタリング、モデリング

ガリの長さや面積はガリ容積と強い相関関係を示し、ガリ谷頭の後退がガリ堤防やベッド侵食に対して重要であることを示唆している。この約60年の間に、3つのサイト(アバガリマ、ディバテ、グダール)すべてでガリ網が大幅に拡大している。しかし、ディバテでは、その程度は低地において局所的である。一方、アバガリマのガリは景観全体で概ね均一に発生しており、グダールは中間的な状況を示しており、サイトによって景観の感度が異なることを示唆している。同様に、ガリ谷頭の後退率と土砂生産量にも大きなばらつきがあり、後退率はグダールの0.76 m/yrからディバテの3.42 m/yrで、これに対応する土砂生産量は8.73 t/ha/yrと49.33 t/ha/yrであった。

日降水量が20mm/dを超えるような降雨強度の高いイベントは、3つのサイトすべてにおいて、ガリ密度と相関関係が弱いことがわかった。アバガリマとディバテでは、ガリの密度と植生被覆の間には負の相関が見られた。グダールで負の相関がみられなかった理由は、グダールにおける優占種 *Acacia decurrens* の植生の性質と特徴に起因すると考えられる。アカシアの植生下にある土地は、下草が少なく、土壌表面が圧縮されていることが特徴であり、その結果、土砂が不足した表面流出が多くなり、その流れがガリ網に入ると、ガリ進行や土砂流送を引き起こす可能性が大きくなる。アバガリマにおけるガリ形成では地表プロセスがより支配的であり、ディバテとグダールでは地中プロセスが支配的であると考えられる(図4)。地中プロセスは、特にディバテではパイピングの影響を強く受け、グダールでも一定の割合でその現象が観察された。このことから、ディバテではシロアリの影響と土壌の引張亀裂、グダールでは不浸透性の土壌が緩い崩積土に覆われているため、土壌プロファイルに依存して土壌の浸透特性が明確に変化すると考えられる。対照的な環境におけるガリ侵食のプロセスとメカニズムの理解を深めることは、この環境や他の類似した環境におけるガリ侵食を正確に予測するモデルの開発に貢献するものである。



図4. エチオピア北西部のガリ侵食における地表流と地中流の潜在的相関関係 (Haregeweyn et al., 2019)

世界の持続可能な土地管理 (SLM) の今後 (図5)

世界中で実施された数千件以上の事例研究を検証した結果、SLM対策の効率性は、対策の種類、実施された気候地域、対策を実施したステークホルダーのタイプなどに影響され、非常に多様であることが分かった。土壌侵食率と直接関連するような大規模な研究を進めている国は世界でもわずかである。しかし、SLMの導入が進んでいる国においても、これに関する十分な研究が実施されていないのが現状である。さらに、土壌侵食の影響を強く受けているにもかかわらず、SLMの実施および研究の両方でスコアが低い国が存在することから、今後のSLM研究及び介入の優先順位付けが必要であると考えられる。

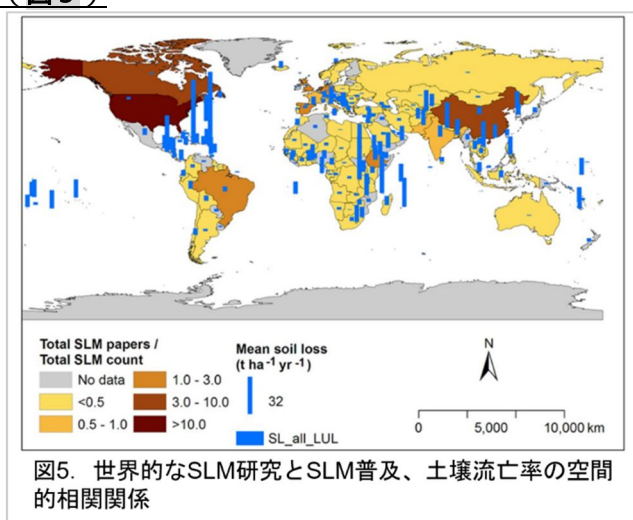


図5. 世界的なSLM研究とSLM普及、土壌流亡率の空間的相関関係

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計9件（うち査読付論文 8件/うち国際共著 9件/うちオープンアクセス 6件）

1. 著者名 Yibeltal, M., Tsunekawa, A., Haregeweyn, N., Adgo, E., Meshesha, D.T., Aklog, D., Masunaga, T., Tsubo, M., Billi, P., Vanmaercke, M., Ebabu, K., Sultan, D., Liyew, M. and Dessie, M.:	4. 巻 179
2. 論文標題 Analysis of long-term gully dynamics in different agro-ecology settings	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 CATENA	6. 最初と最後の頁 160-174
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.catena.2019.04.013	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 該当する
1. 著者名 Berihun, M.L., Tsunekawa, A., Haregeweyn, N., Meshesha D.T., Adgo, E., Tsubo, M., Masunaga, T., Fenta A.A., Sultan, D. and Yibeltal M.	4. 巻 87
2. 論文標題 Exploring land use/land cover changes, drivers and their implications in contrasting agro-ecological environments of Ethiopia	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Land Use Policy	6. 最初と最後の頁 104052
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.landusepol.2019.104052	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 該当する
1. 著者名 Yibeltal, M., Tsunekawa, A., Haregeweyn, N., Adgo, D., Meshesha, D.T., Aklog, D., Masunaga, T., Tsubo, M., Billi, P., Ebabu, K., Fenta, A.A. and Berihun, M.L.:	4. 巻 341
2. 論文標題 Morphological characteristics and topographic thresholds of gullies in different agro-ecological environments	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 GEOMORPHOLOGY	6. 最初と最後の頁 15-27
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.geomorph.2019.05.012	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 該当する
1. 著者名 Fenta, A. A., Tsunekawa, A., Haregeweyn, N., Poesen, J., Tsubo, M., Borrelli, P., Panagos, P., Vanmaercke, M., Broeckx, J. and Yasuda, H.:	4. 巻 703
2. 論文標題 and susceptibility to water and wind erosion risks in the East Africa region	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 SCIENCE OF THE TOTAL ENVIRONMENT	6. 最初と最後の頁 135016
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.scitotenv.2019.135016	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 該当する

1. 著者名 Berihun, M.L., Tsunekawa, A., Haregeweyn, N., Meshesha, D.T., Adgo E., Tsubo, M., Masunaga, T., Fenta, A.A, Sultan, D., Yibeltal M. and Ebabu K.:	4. 巻 689
2. 論文標題 Hydrological responses to land use/land cover change and climate variability in contrasting agro-ecological environments of the Upper Blue Nile basin, Ethiopia	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 SCIENCE OF THE TOTAL ENVIRONMENT	6. 最初と最後の頁 347-365
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.scitotenv.2019.06.338	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 該当する

1. 著者名 Fenta, AA., Yasuda, H., Shimizu, K., Ibaraki, Y., Haregeweyn, N., Kawai, T., Belay, AS., Sultan, D., Ebabu, K	4. 巻 212
2. 論文標題 Evaluation of satellite rainfall estimates over the Lake Tana basin at the source region of the Blue Nile River	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Atmospheric Research	6. 最初と最後の頁 43-53
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.atmosres.2018.05.009	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 該当する

1. 著者名 Tilahun, AK., Haregeweyn, N. and Pingale, SM	4. 巻 4
2. 論文標題 Landscape changes and its consequences on soil erosion in Baro river basin, Ethiopia	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Modeling Earth Systems and Environment	6. 最初と最後の頁 793-803
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s40808-018-0466-5	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 該当する

1. 著者名 Haregeweyn, N., Tsunekawa, A., Poesen, J., Tsubo, M., Meshesha, DT., Fenta, AA., Nyssen, J., Adgo, E.	4. 巻 574
2. 論文標題 Comprehensive assessment of soil erosion risk for better land use planning in river basins: Case study of the Upper Blue Nile River	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Science of the Total Environment	6. 最初と最後の頁 95 ~ 108
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.scitotenv.2016.09.019	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 該当する

1. 著者名 Haregeweyn, N., Tsunekawa, A., Poesen, J., Tsubo, M., Meshesha, D.T., Fenta, A.A., Nyssen, J., Adgo, E.,	4. 巻 574
2. 論文標題 Comprehensive assessment of soil erosion risk for better land use planning in river basins: Case study of the Upper Blue Nile River	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Science of the Total Environment	6. 最初と最後の頁 95 &108
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.scitotenv.2016.09.019	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 該当する

〔学会発表〕 計7件 (うち招待講演 0件 / うち国際学会 6件)

1. 発表者名 Haregeweyn, N., Yibeltal, M., Liyew, M., Tsunekawa, A., Mitusr, T., Fenta, A.A., Meshesha, D.T. and Vanmaercke M.:
2. 発表標題 Comprehensive gully erosion characterization, monitoring and modelling: case studies from three contrasting sites in the Upper Blue Nile basin
3. 学会等名 8th International Symposium on Gully Erosion (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Haregeweyn, N., Tsunekawa, A., Tsubo, M., Fenta, A. A., Ebabu K., Kebede, B., Berihun, M.L. and Yibeltal, M.
2. 発表標題 Overview of global SLM: A review on its distribution, successes and failures and its implications towards achieving a LDN world
3. 学会等名 American Geophysical Union (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Ebabu, K., Tsunekawa, A., Haregeweyn, N., Adgo, E., Meshesha, D., Aklog, D., Masunaga, T., Tsubo, M., Sultan, D., and Fenta, A.A.:
2. 発表標題 Runoff, soil loss, and soil properties as influenced by land use and management practices: Case study from the Upper Blue Nile basin, Ethiopia
3. 学会等名 American Geophysical Union (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Yibeltal, M., Tsunekawa, A., Haregeweyn, N., Adgo, E., Meshesha, D.T., Masunaga, T., Tsubo, M., Ebabu, K., Fenta, A.A. and Berihun, M.L.
2. 発表標題 Analyzing long-term effect of gully erosion on land degradation in Upper Blue Nile basin, Ethiopia
3. 学会等名 American Geophysical Union (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Fenta, A.A., Tsunekawa, A., Haregeweyn, N., Tsubo, M., Poesen, J., Borrelli, P., Panagos, P., Vanmaercke, M. and Broeckx, J.
2. 発表標題 Assessment of water and wind erosion risk over the Eastern Africa region. Paper presented at the FAO Soil Erosion Symposium
3. 学会等名 FAO Soil Erosion Symposium (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Haregeweyn N., Tsunekawa, A., Yibeltal, M., Liyew, M., Ebabu, K., Tsubo, M. Derege, T.M
2. 発表標題 The Dynamics and Counter Measures of Land Degradation: A Comparative Study of Three Paired Watersheds in Northwest Ethiopia
3. 学会等名 International Soil Erosion Research Forum (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Nigussie Haregeweyn
2. 発表標題 Analysis of gully erosion features under three contrasting environments of the Upper Blue Nile basin
3. 学会等名 Gully erosion inventory and proposal for a modelling activity
4. 発表年 2017年

〔図書〕 計1件

1. 著者名 Vanmaercke, M., Haregeweyn N., Zenebe, A., Nyssen, J. and Poesen, J	4. 発行年 2019年
2. 出版社 Springer Science+Business Media Dordrecht	5. 総ページ数 678
3. 書名 Nyssen J (ed.), Geo-Trekking in Ethiopia's Tropical Mountains - The Dogu'a Tembien District	

〔産業財産権〕

〔その他〕

Research Gate https://www.researchgate.net/profile/N_Haregeweyn
--

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
---------------------------	-----------------------	----

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2件

国際研究集会 8th International Symposium on Gully Erosion	開催年 2019年～2019年
国際研究集会 American Geophysical Union Fall Meeting	開催年 2019年～2019年

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
---------	---------