

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 6 年 5 月 22 日現在

機関番号：11601

研究種目：挑戦的研究（萌芽）

研究期間：2021～2023

課題番号：21K18740

研究課題名（和文）エントロピー生成最大化原理による河道網形成メカニズムの探索と数理形態学への挑戦

研究課題名（英文）Searching for the mechanism of river channel network formation using the maximum entropy production principle and challenge to mathematical morphology

研究代表者

横尾 善之（YOKOO, Yoshiyuki）

福島大学・共生システム理工学類・教授

研究者番号：90398503

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 4,800,000円

研究成果の概要（和文）：本研究は、エントロピー生成最大化（MEP）原理に従って、樹状構造をなす河道網や樹木の枝、自然界の縞模様や斑模様が形成されている可能性を明らかにすることを目的として実施した。まず、降雨流出氾濫モデルを利用して河道とそれ斜面における摩擦損失エネルギーを計算した結果、全摩擦損失エネルギーが最小になるように河道と斜面が配分される傾向があったことから、MEP原理に従って河道網が形成されている可能性が見出された。次に、反応移流拡散方程式に立脚した河床波モデルを用いて、反応・移流・拡散の各現象が一定の条件を満たす場合に河床波が形成されることから、河床波もMEP原理に従って形成されている可能性が示された。

研究成果の学術的意義や社会的意義

従来、河道網や河床波の形成が、エントロピー生成最大化（MEP）原理に支配されている可能性を実践的に調べた研究はなかったが、本研究はこれに初めて取り組んだ。これにより、河道網や河床波がなぜ形成されるのか、という高次の謎に迫ることができた。今後、自然界や人間社会で共通して見られる模様が形成される要因がMEP原理によって明らかになる可能性がある。そのような成果は、従来の学問分野を超越した新しい学問領域を創出し、それらの応用が我々の社会や生活を革新的に効率化できる可能性がある。

研究成果の概要（英文）：The present study aimed at clarifying the possibility of the formation of a tree-structured river channel network, tree branches, and natural striped and mottled patterns according to the maximum entropy production (MEP) principle. First, the frictional energy loss in the river channel and on the slope connected to the river was calculated using a rainfall-runoff inundation model. The results showed that the channel and slope tended to be distributed so that the total frictional energy loss was minimized, indicating that the river channel network may be formed according to the MEP principle. Next, using a riverbed wave model based on a reaction-advection-diffusion equation, it was shown that riverbed waves are formed when the reaction, advection, and diffusion phenomena satisfy certain conditions, indicating that riverbed waves may also be formed according to the MEP principle.

研究分野：流域水文学

キーワード：河道網 降雨流出氾濫モデル 河床波 反応 移流 拡散

1. 研究開始当初の背景

(1) この研究構想に至った背景と経緯

研究代表者は降雨流出モデルを用いて、流域内の降雨流出現象の実像に迫る研究を展開してきた。この間、降雨流出モデルは空間的な位置を固定した河道流モデルとダルシー則 (Darcy, 1856) を基盤として空間平均的流動を表現する一般的なモデルを使用した(図1)。その一方、降雨流出減少の観測研究は、地表面の河川でも地下の大空隙網でも水は空間的に集中して流れ(図2)、それが時空間変化して流動し、降雨に対する応答が速い成分を形成することが報告してきた。これらの観測研究の成果を受けて、研究代表者は空間的に均質な流れと不均質な流れが混在する現象を明示的に扱う次世代の研究が必要と強く認識した。

2017年にデルフト工科大学に所属していた教授と交わした議論の中で、エントロピー生成最大化 (Maximum Entropy Production: MEP) 原理 (Kleidon and Lorenz, 2004) によって、空間的に均質な流れと不均質な流れが混在する現象を明示的に扱える可能性に気付いた。そこで、文献調査や疑似河道網を自在に作成する計算機プログラムの作成などの予備的研究に着手した。

(2) 学術の現状、挑戦的研究としての意義と可能性

現在でも降雨流出や陸面過程を記述する主な式は、ダルシー則 (Darcy, 1856) やそれを拡張した Richards (1931) の式のままであり、水循環研究の理論的發展はほとんど見られない。その一方、MEP 原理を提唱した Kleidon et al. (2013) を中心とする欧州の研究グループは、地球上の物質と熱の動態に関する理論的發展を実現した(図3)。水循環分野では、Zehe et al. (2010) が土壌内の水の動態に MEP 原理を適用しているが、地表流と河道流や、自然界の縞・斑模様などの成因に関する研究への適用は行われていない。ここに MEP 原理と既存研究を融合した新たな研究が展開できる可能性がある。

本研究がそのような取り組むことにより、数理形態学的な成果を創出しつつ、MEP 原理と既存研究を融合した新しい研究手法・学際研究領域の開拓にも挑戦できる可能性が高い。ここに、本研究を挑戦的研究として実施する意義と可能性がある。

2. 研究の目的

本研究は、非平衡熱力学の最新の成果として得られた MEP 原理を導入することにより、自己組織化構造の一つと言える河道網構造における多様性の決定要因を探索し、従来の河川工学の枠を大きく越えた新しい研究の方向性を打ち出すことを目的とする。さらに、自然界で観察される縞模様や斑模様などの自己組織化構造における多様性の決定要

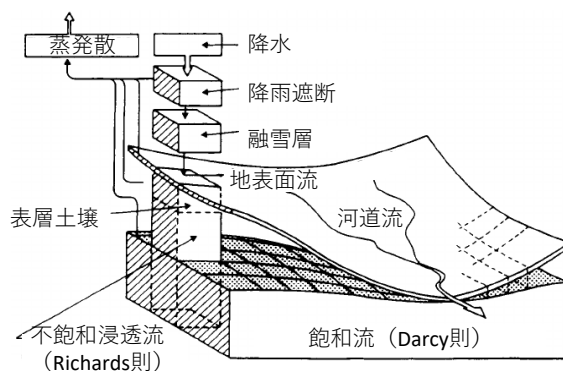


図1 一般的な降雨流出モデルの構成 (Refsgaard and Storm, 1995 を改変)

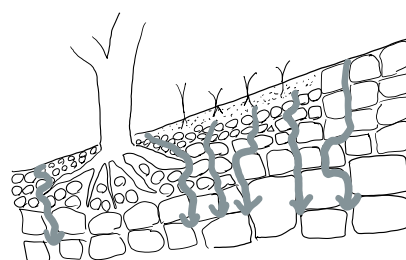


図2 観測研究が明らかにした空間的に集中した流れ

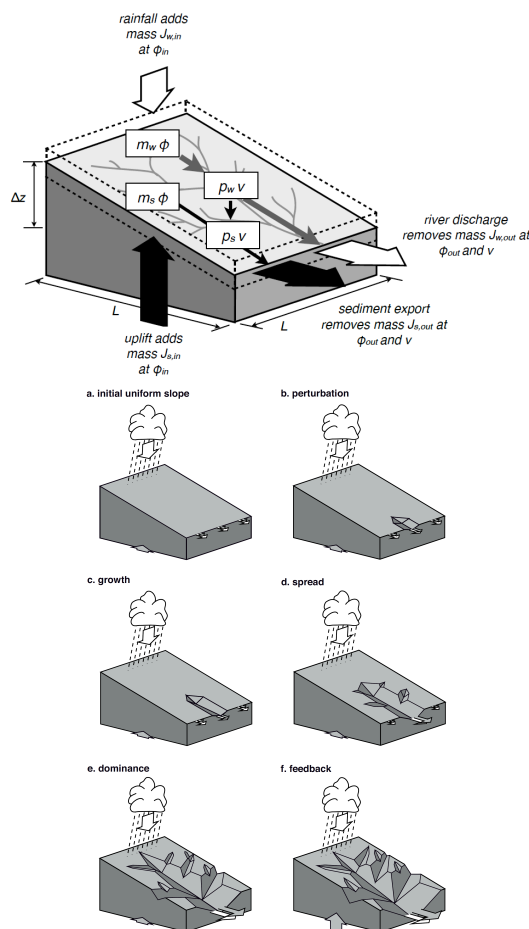


図3 地殻変動と風化現象を踏まえた流域の土砂動態モデルとその理論的検討例 (Kleidon et al., 2013)

因について MEP 原理を応用して探索する。これにより、従来の学術体系を越え、多くの学問分野に共通して適用可能な数理形態学をコアとする新しい学際領域を開拓することを目指す。

3. 研究の方法

(1) 河道網構造の決定要因の探索

本研究は、まず河川流域の河道網構造の多様性の決定要因を探索した。具体的には、擬似流域モデルや降雨流出氾濫モデルにおいて流域を河道とそれに接続される斜面に分け、流域内に与えられた降雨が流域外に流出する際に河道および斜面で生じる摩擦損失エネルギーを計算し、MEP 原理に従って全摩擦損失エネルギーが最小になるように河道網が形成されている可能性を調べた (図 4)。

(2) 縞・斑模様の決定要因の探索

次に、自然界の自己組織化の代表例である縞模様や斑模様の決定要因について MEP 原理を用いて探索した。生体の表面などに散見される縞模様や斑模様は 2 成分の反応拡散方程式 (Turing, 1952, PTRS) で表現され、縞模様や斑模様の発現は各成分の拡散項や反応項が一定の条件を満たすときに発現するとされている (Kondo, 1995, Nature)。そこで本研究は、河床に見られる縞模様や斑模様が発生する条件を反応移流拡散方程式で探り、縞模様や斑模様が発生するときの移流項、拡散項、反応項のバランスが MEP 原理で決定されている可能性を探った (図 5)。

4. 研究成果

2021 年度は、平板上の開水路流に単純化した降雨流出モデルを構築した。このモデルを利用して河道領域とそれに接続する斜面領域における摩擦損失エネルギーを計算した。MEP 原理に従って河道網は形成されると仮定すると、全摩擦損失エネルギーが最小になるように河道と斜面の面積が最適配分される。構築したモデルでこの仮説を検証した結果、全摩擦損失エネルギーが最小となる河道網は実在する流域の河道網に似た構造となることが分かった (図 6, 後藤・横尾, 2022)。

2022 年度は、縞模様の河床波が MEP 原理によって形成される可能性を検討した。反応移流拡散方程式に立脚したモデルを用いて反応・移流・拡散の各現象が一定の条件を満たす場合にのみ、河床波が形成されることを確認した (荒木・横尾, 2023)。

2023 年度は、降雨流出氾濫モデルを利用して、実流域における河道および斜面における全摩擦損失エネルギーを計算した。その結果、全摩擦損失エネルギーを最小化する河道および斜面の構成比率は見出せなかった (阿部・横尾, 2024)。これは、2021 年度に実施した試算とは計算方法が異なることが原因であることが後に判明した。また、反応移流拡散方程式に立脚した河床波モデルを用いて、反応・移流・拡散の各現象が河床波の成長に与える影響を定量的に明らかにした (図 7, 荒木・横尾, 2024)。

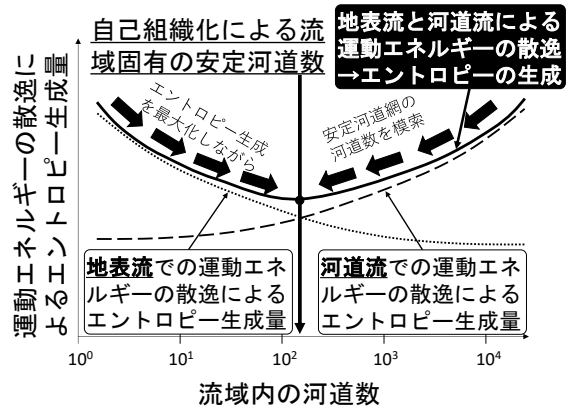


図 4 エントロピー生成最大化原理を用いて流域固有の河道数の決定要因を探索する方法の概念図

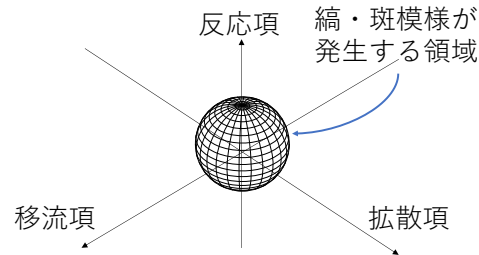


図 5 エントロピー生成最大化原理を用いて縞・斑模様が発生する反応項・移流項・拡散項の大きさの領域特定の方法の概念図

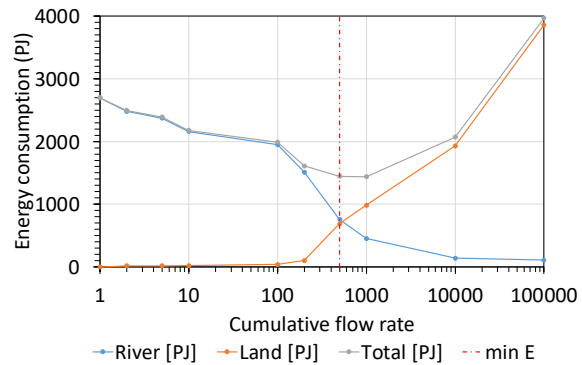


図 6 MEP 原理に従って河道と斜面における全摩擦損失エネルギーが最小化される河川密度を北上川流域で特定した結果 (後藤・横尾, 2023)

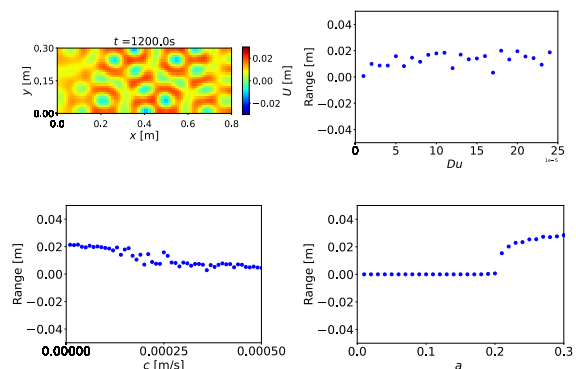


図 7 河床波が発生する際の反応項・移流項・拡散項の係数の影響を調べた結果 (荒木・横尾, 2024)

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計6件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 1件）

1. 発表者名 後藤元樹, 横尾善之
2. 発表標題 エントロピー生成率最大化の原理に基づく河道網の形成要因の探索
3. 学会等名 水文・水資源学会 / 日本水文科学会2022年度研究発表会, 0P-7-01, 京都大学, 2022年9月6日.
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 荒木英介, 横尾善之
2. 発表標題 反応移流拡散方程式を用いた河床波モデリングに関する検討
3. 学会等名 令和4年度土木学会東北支部技術研究発表会, 11-51, 東北工業大学（オンライン）, 2023年3月4日.
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 後藤元樹, 横尾善之
2. 発表標題 エントロピー生成率最大化の原理に基づく河道網の形成要因の探索
3. 学会等名 令和3年度土木学会東北支部技術研究発表会, 11-43, 八戸, 2022年3月5日（オンライン開催）.
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Eisuke Araki, Yoshiyuki Yokoo
2. 発表標題 Preliminary Study on River Bedform Modeling Using Reaction-advection-diffusion Equation
3. 学会等名 Asia Oceania Geosciences Society 20th Annual Meeting (AOGS 2023), HS28-A009, Singapore (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 阿部温駿, 横尾善之
2. 発表標題 分布型降雨流出モデルを用いた実河道網の決定要因の探索
3. 学会等名 令和5年度土木学会東北支部技術研究発表会, 11-20, 岩手大学
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 荒木英介, 横尾善之
2. 発表標題 反応移流拡散方程式を用いた河床波モデリングの試み
3. 学会等名 令和5年度土木学会東北支部技術研究発表会, 11-3, 岩手大学
4. 発表年 2024年

〔図書〕 計0件

〔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
研究協力者	後藤 元樹 (Goto Haruki)	福島大学・大学院共生システム理工学研究科・大学院生 (11601)	河道網構造に関する数値計算
研究協力者	荒木 英介 (Araki Eisuke)	福島大学・大学院共生システム理工学研究科・大学院生 (11601)	河床波に関する数値計算
研究協力者	阿部 温駿 (Abe Haruto)	福島大学・大学院共生システム理工学研究科・大学院生 (11601)	降雨流出氾濫モデルを用いた数値計算

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0件

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