

エントロピー生成率最大化の原理による河道網形状の形成要因に関する予備的検討

福島大学共生システム理工学類 学生会員 ○後藤 元樹

福島大学共生システム理工学類 正 会 員 横尾 善之

1. はじめに

これまで、河道網構造の規則性に関して、Gray (1961) や Seybold (2017) などをはじめとする数多くの研究が行われてきた。しかし、河道網の形成要因については自然界の多様な要素を含むため特定は容易ではなく、未だ十分に解明されていない。一方、世界のデジタル標高データは整備されており、年々高解像度化が進んでいる。これらのデータを使えば、世界中の河道網構造を詳細かつ定量的に比較することができる状況にある。さらに、Kleidon *et al.* (2013) は、非平衡熱力学の成果である「エントロピー生成最大化の原理」によって、流域からの土砂生産と河道網の形成が説明できる可能性を理論的に示している。そこで、本研究では、開放系の散逸構造はエントロピー生成率が最大になるように成立するという「エントロピー生成最大化の原理」に着目し、河川の流域地形はエントロピーが増大し続けずにその形状を保っていることは、降雨を速やかに流域外に排出して最小のエネルギー消費状態を最速で達成した結果であるとの仮説を立て、この仮説によって自然界の河道網形成要因を特定する可能性を探ることを目的として実施した。

2. 方法

本研究は、河川長や流域面積の値が異なる日本の一級河川である 8 流域（網走川、岩木川、名取川、小丸川、北川、阿武隈川、利根川、土器川）を対象とした。まず、各流域の標高データを利用して擬河道網を作成した。次に、作成された擬河道網から集水面積、総河道長、河川密度、河道長比、分岐比、分岐角、勾配比などの特性値を算出した。なお、累積流量が 100 以上の地点を河川とみなした。その一方で、「エントロピー生成最大化の原理」に従って、現在の河道網は陸地を水が流れる際の摩擦エネルギー消費と河道を水が流れる際のエネルギー消費が最小になるように形成されていると仮定し、一定量の雨水を流す際の陸地および河道での摩擦エネルギー消費量を別々に計算した。その際、陸地と河川の水深を変化させ、陸地と河道に幅広矩形断面を仮定し、マニングの式に勾配や径深を入力して、流量から計算した。エネルギー消費量は河道横断面の全剪断力に総河川長を乗じることで計算した。なお、集水面積の増大に応じて河道幅も増大させた。以上から、「エントロピー生成最大化の原理」によって最終的にどのような最小のエネルギー消費状態を達成し、各流域で形成されている河川密度が決定されているか検討した。

3. 結果

本研究は予備段階として、8 つの対象流域の河川密度とエネルギー消費量の関係を調べた結果を示す。表 1 は各流域の特性値である。図 1 から 4 はそれぞれ網走川、岩木川、阿武隈川、利根川の各流域の結果である。各図から、河道網が最小のエネルギー消費にあるとすると、その状態の達成には陸地の方が河川よりも多い状態で達成されていることが分かる。これは現実の河川密度と整合する結果と言える。言い換えると、水深が陸地に比べて大きくなり、摩擦エネルギー損失が少ない河川が流域全域に広がれば良いわけではなく、陸地と河川の最適な配分が存在することを示していると考えられる。図 5 は、河川のエネルギー消費量に対する陸地のエネルギー消費量の比を示している。この図から、河川密度が高いほど陸地のエネルギー消費が相対的に小さくなることを示している。なお、この比率が小さく維持できるのは降水量が大きく河川が発達しやすい流域であることは示唆的であり、今後も解析を進める予定である。

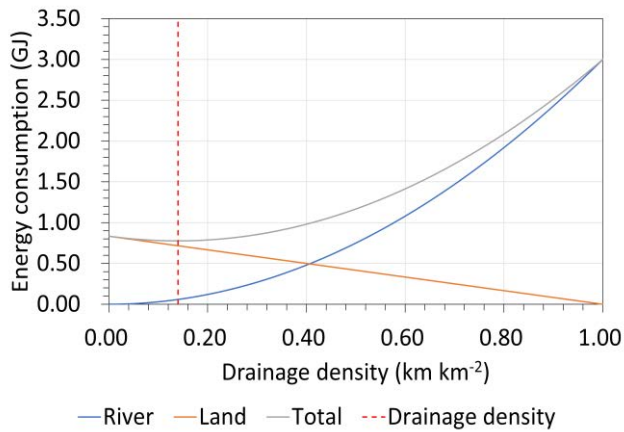


図 1 網走川のエネルギー消費

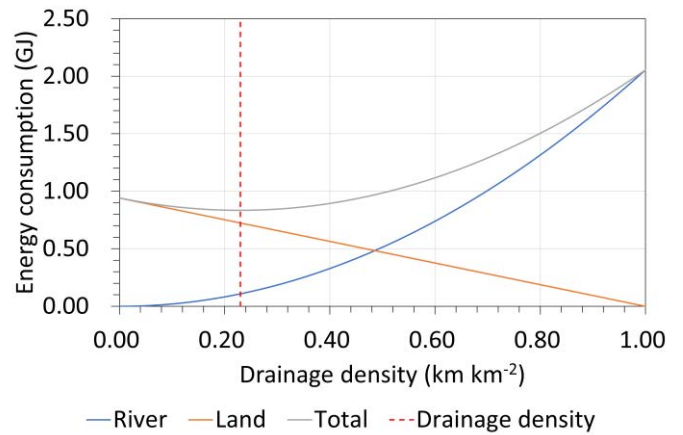


図 2 岩木川のエネルギー消費

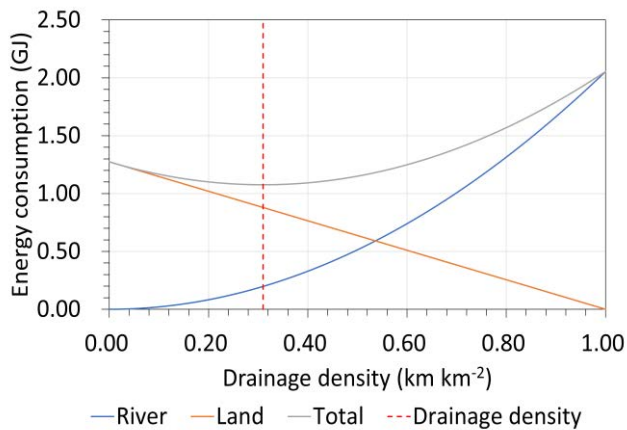


図 3 阿武隈川のエネルギー消費

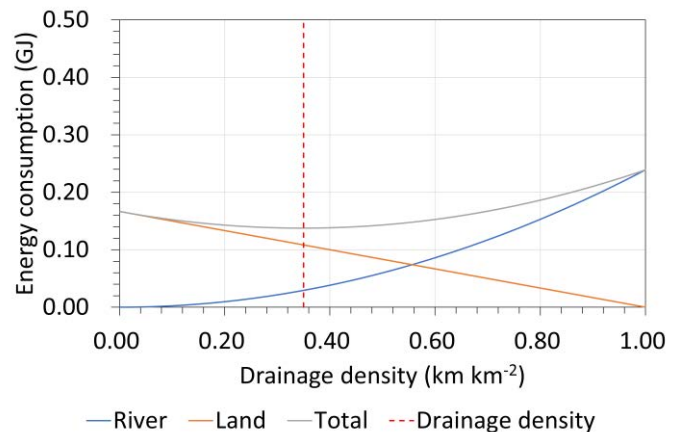


図 4 利根川のエネルギー消費

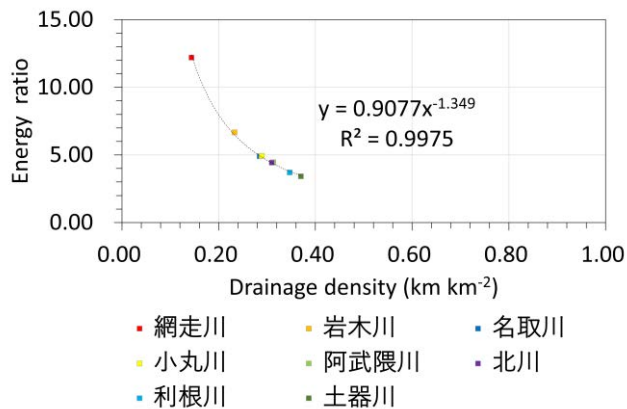


図-5 河川のエネルギー消費量に対する
陸地のエネルギー消費量

表-1 算出した河道網特性値

河川名称	総河川長 (km)	流域面積 (km ²)	河川密度
網走川	199	1380	0.144
岩木川	591	2540	0.233
名取川	268	939	0.285
小丸川	137	474	0.289
北川	65	210	0.310
阿武隈川	1692	5400	0.313
利根川	5836	16842	0.347
土器川	47	127	0.370

謝辞

本研究は NASA の SRTM-3 データを使用した．ここに謝意を記す．

参考文献

- Gray DM (1961) Interrelationships of watershed characteristics, *Journal of Geophysical Research*, 66, 1215-1223, 1961. DOI: 10.1029/JZ066i004p01215.
- Seybold H, Rothman D, Kirchner J (2017) Climate's watermark in the geometry of stream networks, *Geophysical Research Letters*, 44, 2272-2280. DOI: 10.1002/2016GL072089.
- Kleidon *et al.* (2013) Thermodynamics, maximum power, and the dynamics of preferential river flow structures at the continental scale, *Hydrology and Earth System Sciences*, 17, 225-251. DOI:10.5194/hess-17-225-2013.