

気候条件の異なる河川の生物量 および物質濃度の流量変化に対する応答解析

岸田 まりな^{1*}・篠崎 由依¹・白川 直樹²

¹筑波大学大学院システム情報工学研究科（〒305-8573 つくば市天王台1-1-1）

²筑波大学システム情報系（〒305-8573 つくば市天王台1-1-1）

* E-mail: s1720926@s.tsukuba.ac.jp

統合解析モデルを用いて仮想的な河川における生物量および物質濃度を計算した。また、生物量が異なる地域における同様の仮想河川でも計算を行い、結果を比較した。さらに流量が減少した場合の生物量および物質濃度の応答を比較した。各生物量や物質は地域によって大小が異なり、その濃度を構成する要素の比重も地域によって異なることが分かった。さらに、流量が減少した場合においては、ある地域で増加する物質であっても別の地域では減少するなど、地域依存の傾向が見られた。そのため、流量調節を行う際には目的とする濃度や状態に応じて行うことが必要であることが示唆された。

Key Words : *environmental flow, integrated model, algae, plankton, biomass, freshwater ecoregion*

1. はじめに

環境流量とは河川生態系の多様性と健全性を保持あるいは回復するために河川に流すべき流量を指す。河川生態系は生息場における水質の影響を受けるため、水質改善を目的に環境流量を放流する場合もある¹⁾。環境流量を設定する際には、日流量などの水文統計を参考に目標流量を定める水文統計法が広く用いられている²⁾が、この方法は流量変動に対する河川生態系の応答との関連性を定量的に結び付けられないという課題がある。従って、河川生態系の特徴に応じて、生物と流量変動の関係を定量的に評価し、環境流量を設定する方法が必要である³⁾。

本研究では、様々な気候条件下における流況変動に対する河川生態系の応答を定量的に記述し、環境流量評価モデルに組み込むことを目的とし、生物量が異なる複数の地域における仮想的な河川を対象とし、流量変化に対する生態系の応答を検討した。

具体的には、河川生態系の生物量が異なる複数の地域を対象に生物量、物質濃度を比較し、流量が減少した場合の応答と物理条件や生物条件の関係性を調べた。

2. 方法

(1) 使用モデル

本研究では溝口⁴⁾の物理場・物質循環・生態系統合解析モデルのうち、生態系モデルおよび物質循環モデルを用いた。本来、物理場解析モデルから生態系モデルおよび物質循環モデルに入力される河川の物理条件に関しては河川縦断方向の空間ステップごとに値を与えた。

物質循環モデルでは有機物、無機物、溶存酸素などの10項目が出力として得られる。また、生態系モデルでは魚類（2分類）、付着性従属栄養生物（5分類）、付着藻類、底生無脊椎動物、植物プランクトン、動物プランクトンの11項目が出力として得られる。それぞれ流下するものに関しては濃度で、流下しないものは河床面積当たりの質量で表される。

既往研究にて著者らは上記2つのモデルを用いて多摩川での再現計算および環境流量の効果の検討を行った。本研究ではこの再現計算に用いた境界条件である2017年の多摩川の拝島橋の測定値を参考に表-1のように境界条件を定めた。また物質循環モデルの初期条件は境界条件と等しく置き、生態系モデルの初期条件は表2のように置いた。

(2) 計算対象河川の設定

本研究では、水面幅100m、横断面勾配が1/50の三角形断面とする仮想的な河川を用いて計算を行った。計算対象区間は12kmとし、評価は下流端2kmを除いた10kmを用いた。河床勾配は1/1000、粗度係数は0.03とし、計算区間内で一定と仮定した。また、流量は20m³/sを基準とし、計算区間内での増減はないものとした。

計算は時間ステップ1秒、空間解像度100mで計算を行った。物質濃度や生物量は縦断方向のみの濃度変化を考える。また、物質循環モデルの物質濃度が定常とみなせる10⁶秒後における結果を考察に用いるものとした。

3. 計算条件

(1) 流量

流量減少に伴う生物量及び物質濃度の変化を見るため、流量を20m³/sから16m³/s、12m³/s、8m³/sと減少させた場合の計算を行った。本モデルでは三角形断面を用いているため、水面幅は流量に伴って減少する。流量によって影響されない物理条件である河床勾配、粗度係数、断面形状は一定とした。

(2) 生物量

物理条件が同等で生物量の異なる河川を想定し比較計算を行う。河道内の物質収支には生物量の大小が大きな影響を与えると考えられることから、生物量の異なる河川とその河川の属する気候条件を用いて計算を行った。対象とする河川の選定には、Freshwater Ecoregion of the World (FEOW) ⁹⁾を用いた。FEOWは全球の淡水生態系を主に魚類の分布特性より分類したものである。この中で、生生物の多様性を示した指標としてRichnessがあり、文献や専門家の意見によって定められている。本研究では水生生物の多様性が高いほど生物量も増加すると考え、Richnessに応じて生物量を変化させた。

本研究ではRichnessが異なる5点を抽出した（表-3、図-1）。ただし平均気温が30℃を下回る地域についてはモデル計算で考慮できない河川凍結の影響が考えられるため対象から排除した。本州、四国、九州のエコリージョンにおけるRichnessと各計算地点のRichnessの比に応じて生態系モデルの初期条件の値を与えた。水温と日射量は、各エコリージョン内における2001年から2010年までの10年間の年平均気温を水温に換算し⁶⁾て使用する。日射量も同様に、10年間の年平均日射量の平均値を使用した。

(3) 世界各地における環境流量の効果の比較

(2)の計算対象地域について、流量が8m³/sに減少した

表-1 境界条件

物質	濃度 [mg/L]	物質・生物	濃度 [mg/L]
粗粒有機物	0.050	アンモニア態窒素	0.010
微粒有機物	0.095	リン酸態リン	0.009
溶存有機炭素	1.2	溶存酸素	9.0
亜硝酸態窒素	0.004	植物プランクトン	0.70
硝酸態窒素	0.63	動物プランクトン	0.010

表-2 初期条件

生物		値
魚類	雑食性	3.0 g/m ²
	藻食性	60.0 g/m ²
底生 無脊椎 動物	破碎食	3.89×10 ² g/m ²
	刈取食者	3.89×10 ⁻¹ g/m ²
	濾過食者	5.83×10 ⁻¹ g/m ²
	堆積物食者	1.55 g/m ²
	捕食者	1.28 g/m ²
付着性従属栄養生物		10.0 g/m ²
付着藻類		3.63 g/m ²
植物プランクトン		0.70 mg/L
動物プランクトン		0.010 mg/L

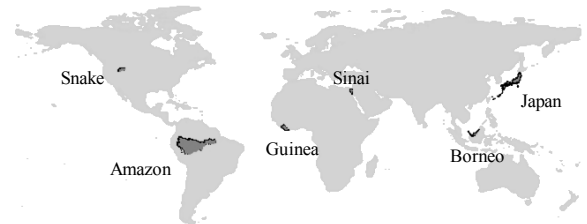


図-1 計算対象地域

表-3 計算対象地域と条件

地域	エコリージョン	気候区分	Richness	水温 [°C]	日射量 [W/m ²]
Japan	Honshu - Shikoku - Kyushu	温暖湿潤	218	12.1	165
Sinai	Sinai	砂漠	1	16.8	248
Snake	Upper Snake	ステップ	23	8.5	205
Borneo	Northwestern Borneo	熱帯雨林	74	20.0	192
Guinea	Southern Upper Guinea	熱帯雨林	155	19.9	183
Amazon	Amazonas Lowlands	熱帯雨林	961	20.6	174

場合を計算した。流量が20m³/sの時と比較するために、20m³/sの場合の各物質や生物量の濃度及び河床面積当たりの量についてどの程度変化するかをしたべた。変化量が値が正であれば流量減少によって濃度あるいは量が減少することを意味する。

4. 結果

(1) 流量減少の影響

物質循環モデルによって計算された物質のうち、NO₃

と PO_4 以外は流量の減少に伴って濃度が増加する傾向がみられた。また、生物量については、付着藻類の下流側や刈取食者の下流側、付着性従属栄養生物を除いて流量減少に伴って現存量が増加した。境界条件および初期条件は変えていないため、流量減少によって生物量に対する物質濃度が高くなったといえる。そのため、栄養塩などの物質濃度の制約を受ける成長速度は、制約物質が高濃度であることにより速度が大きくなったと考えられる。

また、付着藻類は下流に向かって現存量が減少し、日射が下層まで届く量に達した点で流量による影響が逆転している。これは成長速度を決定する要因が栄養塩から藻類に届く日射量へと変化したことを示している。つまり、藻類の下層まで日射が届く範囲においては日射量、届かない範囲においては栄養塩が成長速度を決定する最大の要素だといえる。さらに計算を行う上では日射量が下層まで届く付着藻類の閾値が重要なパラメータであると考えられる。付着藻類を摂食する刈取食者は付着藻類の現存量と同様の傾向を示していた。

(2) 世界各地を仮定した計算

a) 生物量

生物量は初期条件として与えた生物量の大小に応じて河川縦断方向の量も地域ごとに異なっていた。つまり、生物量が多いAmazonで生物量が最も多く、最も少ない入力条件を与えたSinaiにおいて生物量が少なくなった。しかし、付着藻類 (Ba) は図-2のように初期条件の生物量の大小と必ずしも一致していなかった。Baは日射量の増加によって増殖速度が増加し、現存量が増加する。そのため、日射量の大きいBorneo, GuineaにおけるBaの現存量が初期条件として与えたBa量が多いAmazonよりも卓越したと考えられる。また、Sinai, Snakeの日射量はBorneo, Guinea, Amazonよりも卓越しているもののBaの現存量が少ないため、Baの現存量に比例するBaの成長速度が小さくなったことが原因である。つまり、Baの成長速度が変化する要因は、Borneo, Guineaでは日射量、Sinai, SnakeではBaの現存量であるといえる。

一方、Japanでは、生物量全体ではAmazonに次いで多いにも関わらず、Ba単体に着目した現存量はAmazonよりも多く、BorneoおよびGuineaよりも少ない結果となった。これにはいくつか要因があるが、浮遊物質 (SS) 濃度が最も影響があった。SSの増加によってBaに届く日射量が遮断され、成長速度が減少する。JapanではAmazonよりもSS濃度が小さく、付着藻類の成長速度がAmazonよりも大きくなったと考えられる。Amazonでは生物量が多いため植物プランクトン (PP) などのSS濃度が他地域よりも多い計算結果が得られた。

Japanでは下流端におけるSS濃度 2.6mg/L であるのに対

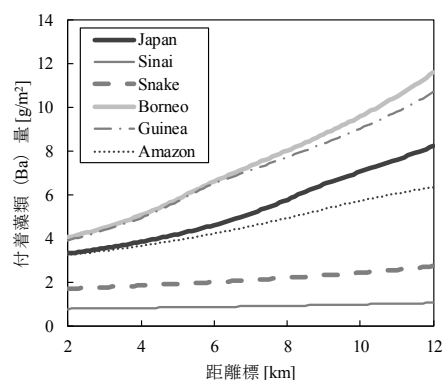


図-2 世界各地における仮想河川の付着藻類量 (Ba)

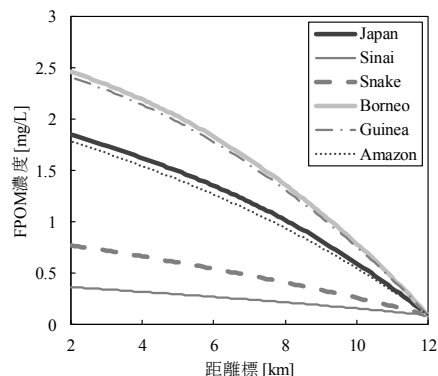


図-3 各計算対象地域の粗粒有機物濃度

し、Amazonでは 5.2mg/L と明らかに高濃度であった。Borneo, GuineaよりもBa量が少ないのはこれらの地域と比較してJapanの日射量が少ないからである。

以上より、Baの現存量は成長速度に大きく依存しており、成長速度は日射量や現存量、SS濃度によって変化する。計算の結果、条件によって成長速度を決定する要因が変わることが分かった。

b) 物質濃度

物質濃度は境界条件を等しく置いているため、地域ごとの変化は濃度の縦断方向変化に現れる。粗粒有機物の堆積物量や粗粒有機物濃度は沈降および巻き上げによる増減が支配的であるため、地域による差はあまり見られなかった。しかし、微粒有機物 (FPOM) 濃度はBaの剥離に伴う増加が支配的となっているため、Baの現存量が多いほどFPOMの下流端濃度が高くなっている (図3)。また、FPOM濃度の沈降によって増加するFPOMの堆積量はFPOM濃度と同様にBorneo, Guineaの下流端量が多くなった。

アンモニア態窒素 (NH_4) 濃度は代謝・分解による負荷として、Ba量およびFPOM濃度の影響を大きく受けていた。しかし、Amazonでは生物量が多いため、雑食性魚類の成長に伴う NH_4 濃度の増加が他の地域よりも大きい結果となった。 NH_4 濃度が最も高いのはAmazon、次いでGuinea, Borneoであった。これらの地域では雑食性魚

類による影響は付着藻類による影響を上回っている。一方、Japanにおける雑食性魚類の影響は付着藻類の影響よりも小さく、BorneoよりもNH₄濃度が低くなった。亜硝酸態窒素（NO₂）は流下や分散等以外で増減するのはNH₄の硝化による増加とNO₂の硝化による減少のみである。そのため、NO₂の下流端濃度はNH₄濃度の大小関係と一致した。

硝酸態窒素（NO₃）濃度はNO₂の硝化によって生成され、Baの増殖や植物プランクトン（PP）の増殖の過程で取り込まれて減少する。生物量が比較的多く、縦断方向に濃度が変化しやすいBorneo, Guinea, Amazon, Japanを比較する。NO₂濃度は高濃度から順にAmazon, Guinea, Borneo, Japanであった。硝化によってNO₂から生成されたNO₃量はNO₂濃度が高いほど多い。しかし他のNO₃生成・分解過程も含めた結果であるNO₃濃度は高濃度順にJapan > Amazon > Guinea > Borneoである。これはNO₂の硝化によるNO₃濃度の増加の影響よりBaの成長によるNO₃濃度の減少の影響の方が、NO₃濃度を決定する過程において支配的であることが考えられる。Ba量はBorneo > Guinea > Japan > Amazonであり、AmazonとJapanの順が逆であるものの、それ以外の濃度はBa量が多いほどNO₃濃度が減少している。JapanよりもAmazonの方がNO₃を消費するBa量が少ないにも関わらずNO₃濃度が低いのは、PP濃度が他の地域より高く、PPによって取り込まれる量が多いからである。よってNO₃濃度はBaの成長速度やPP濃度によって変化するといえる。

(3) 世界各地における環境流量の効果比較

粗粒有機堆積物（Secp）や粗粒有機物（CPOM）、溶存酸素濃度（DO）は流量変化による地域差がほぼ見られなかった。増減の要因となる生物量は地域によって変化しているため、生物量の影響を比較的受けにくいパラメータだと考えられる。

また、(1)でJapanが流量減少によって濃度増加していた物質でも別の地域では濃度減少するなど、計算対象地域によって流量による効果が異なった。Baを例にとると、Japanでは日射量の閾値を境に、河川流下方向に増加から減少へと変化した。Ba量が少ないSinaiやSnake, Amazonでは常に増加傾向であった（図4）。これは日射が常にBaの下層まで届いているため、流量減少によって水深が浅くなり、Baに届く日射が増えたことが原因だと考えられる。

他の物質や生物量についても、流量減少によって河川生態系や水質が受ける影響が異なるため、求める条件に応じて流量を調節する必要があると考えられる。

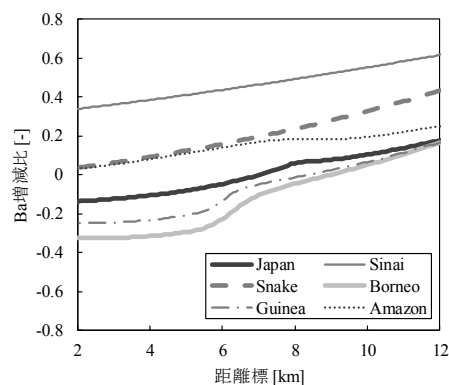


図4 流量を減少させたときの付着藻類の変化量

5. まとめ

本研究では、気候条件や生物量の違いにより、生物量や物理量が流量減少に対してどのように応答するかについて、モデル計算により検討を行った。その結果、地域によって特定の物質や生物量を算出する際に影響が大きいパラメータや要素が異なることが分かった。また、流量減少に対する応答も地域によって異なることが明らかになった。このことから、日射量などの物理条件や生物量によって応答が異なるため、物理条件や生物条件に応じて流量調節をする必要がある。つまり、年平均流量などに対する比率のように、水文統計量に対して一律の流量を与える従来の水文統計法では、流量の増減に対し異なる応答を見せる河川生物や物質の状態を考慮できないといえる。そのため、河川生態系を評価する際には本モデルのように生物量や物質濃度が物理条件によって変化する手法を用いる必要がある。

参考文献

- 1) Yang, Y., Chen, H. and Yang, Z. F.: Integration of water quantity and quality in environmental flow assessment in wetlands, 18th Biennial ISEM Conference on Ecological Modelling for Global Change and Coupled Human and Natural Systems, 13, pp.1535-1552, 2012.
- 2) Thame, R. E.: A global perspective on environmental flow assessment: emerging trends in the development and application of environmental flow methodologies for rivers, River Res. Appl., 19, pp.397-441, 2003.
- 3) Poff, N. L. and Zimmerman, J. K.: Ecological responses to altered flow regimes: A literature review to inform the science and management of environmental flows, Freshw. Biol., 55, pp.194-205, 2010.
- 4) 溝口裕太：河川水系を一貫した物理場・物質循環・生態系統合解析モデルの開発，名古屋大学工学研究科博士論文，2017.
- 5) Freshwater Ecoregions of the World: <http://www.feow.org/>（最終閲覧日：2018年7月9日）
- 6) Webb, B.W. and Nobilis, F.: Long-term perspective on the nature of the air-water temperature relationship: A case study, Hydrological Processes, Vol. 11, pp. 137-147, 1997.