

湧水・地下水に関わる河川生態学研究の展望

北海道大学大学院地球環境科学研究院 根岸淳二郎

1. はじめに

一般的に、広義には地下部に存在する水が地下水であり、湧水とは、地下水が地表部に湧出したものである。河川生態系の構造と機能を理解する上で湧水と地下水に関する生態学的な知見は重要な役割を果たしてきた。これは、河川(地上)を流れる表面水に対して、湧出する地下水が特異な水質や様々な物理的な特性を有し、豊富に湧出する河川や地下水が表面水と混合する河床堆積物中の飽和間隙水域で、特異な物質循環プロセスを駆動、あるいは生物の生息場を形成することに関係している。水循環の観点からは、表面水と地下水は物理的に連続しており、しばしば複雑に相互作用する。その結果、河川生態系の生物相の分布や群集構造、あるいは、物質循環において地下水は切り離すことのできない重要な構成要素となっている。このことから、湧水・地下水ともに、河川環境保全における重要な対象項目となるべきである。ここで、湧水・地下水に関連して河川生態系の包括的な理解にとって重要な視点や研究アプローチの整理を行う。また、著者らが地下水に関わる研究から得つつあるいくつかの成果を簡単に紹介しながら、今後の研究への展望を示す。

2. 流域ネットワークにおける湧水と地下水

流域(河川)ネットワークの中で、湧水や地下水の河川との接点と構造を体系的に整理する際に、湧出地点の物理的特性へ注目することは有効である(図1)。特に、地下水が湧出直後に表面水とどの程度混合するか観点が重要である。

第一に、平常時において地下水がほぼ100%で湧出する状態で、これは、湧出地点が河川源頭部に位置する場合などである。河川は源流域までその源をたどれば、地下水の湧出が基底流としてその流量成分において卓越する。扇状地端部などの低地や段丘面などから地下水が帯水層を通して豊富に湧出し、集水地形により規定されていないような場合、地下水が卓越した状態が常時維持される。このような河川は、湧水河川と整理できよう。一方で、降雨や融雪により地表面起源の表面流などからの影響が強い集水地形に位置する場合、洪水流において流量成分に基底流起源の地下水の占める割合は相対的に低下する。この場合、常時、地下水が卓越するわけではない。流量における地下水の卓越度に関する明確な区別があるわけではないが、前述の湧水河川と対比する目的でここでは後者を非湧水河川と呼ぶ。湧水河川も、河川ネットワークの中で、非湧水河川と合流、あるいは、長い

時間の流下を経ると、その様々な地下水に特異な特性(例えば水温)は不明瞭になる。

第二に、湧出地点が表面流の卓越する場所に位置する場合である。このような状況は、河床内の飽和間隙域にある地下水が河床から湧出する箇所が生じる(図2)。飽和した河床間隙水域の地下水は、その上流域で河床内に浸透した表面水、あるいは、表面水との接触を経していない地下水などを含む。湧出部に流れる表面水と湧出水の諸特性の差異は、湧出までの経路や時間などに依存する。

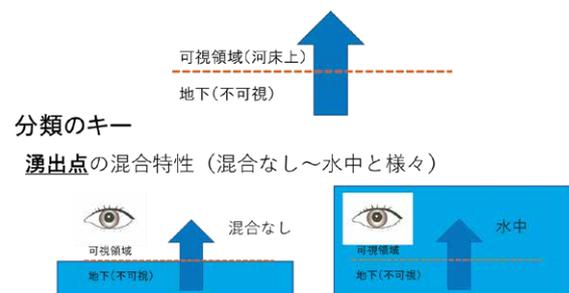


図1 湧出地点特性と地下水タイプ化

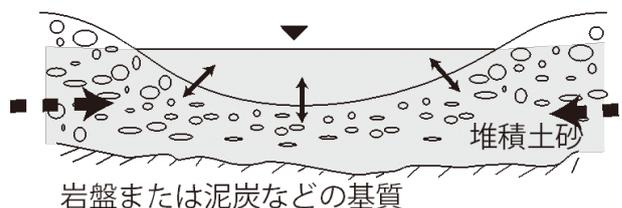


図2 河床飽和間隙域の地下水湧出

3. 湧水河川の機能

湧水河川と非湧水河川との対比は、多くの研究成果が蓄積している分野である。水生生物の群集構造が大きく異なる、あるいは、同種においても生活史タイミングが異なる¹⁾。これは、両タイプで、生物の適応度に大きな影響を与える、流量の変動パターンや、平均的な水温や水質に違いがあるからである。たとえば、表面流の影響をあまり受けない湧水河川であれば、安定した河床環境が維持され、物理的なく乱に比較的弱い種でも生存が可能である。

近年の研究では、河川ネットワーク構造の中の水温環境の違いを、水生昆虫の一部がその生活史の異なる段階で移動・分散により利用していることが、明らかになりつつある²⁾。また、近縁種であっても、水温環境の異なる場では、生活史タイミングの不一致から、種内の遺伝的分化につながり、景観レベルでの遺伝的多様性を高める可能性も考えられる。湧水河川が河川ネットワークの中で、水温環境の異なる生息

場を提供するとすれば、同様の事象が起きている可能性がある。このように、湧水河川と非湧水河川との環境の違いに起因する研究の焦点は、両者間の生物群集構造の違いから、景観スケールでの個体群動態や種の集団遺伝構造に果たす役割へ変わりつつある。

4. 飽和河床間隙域の機能

飽和河床間隙域に関わる研究は、物質循環や生息場所としての観点から行われてきた³⁾。河床内部で表面水と地下水が混合して、溶存酸素濃度や動水勾配などの影響を受けて、硝化や脱窒などの重要な物質循環に関わる反応や熱交換が多様な時空間スケールで起こる。また、微小な無脊椎動物(水生昆虫の幼虫や甲殻類)が多く生息する。

これら無脊椎動物の生息環境とその群集構造は様々な物理化学的な(間隙の大きさや水質など)環境要因によって変化する。米国モンタナの河川では、土砂堆積物に富む扇状地河川において、河川横断方向数キロメートル離れた箇所でもカワゲラ目の水生昆虫が高い生息密度で生息する⁴⁾。日本における報告は非常に断片的である。北海道苫小牧を流れる幌内川では、ミドリカワゲラ科の水生昆虫が間隙に生息する生物として報告されている。安定同位体比を用いた分析手法より、表面水環境で存在するものとは大きく異なるエサ資源を摂餌していることが示された⁵⁾。

これらの重要な機能を果たすことから、飽和河床間隙水域機能の保全・再生の必要性は強調されているが、河川環境評価において、地下環境が項目に挙げられることはほとんどない。河床間隙域の空間的な広がり、堆積物による物理構造が最大値を示す扇状地河川で、その他の森林河川などに比較して、最大値を示すことが概念上整理されている⁶⁾。したがって、扇状地河川のような環境では、河床間隙域の果たす機能を大きく見誤ってしまう可能性があり、その定量的な評価が求められる。

5. 河川整備事業との連携による地下環境評価

一般的に、河川底生動物に関わる生物相調査は、河床表面から生物採取を行うため、河床内部の生物は定量評価されず環境指標に反映されない。飽和間隙水域に関する研究事例が限定的であり、環境評価やモニタリングにおける本領域の扱いが不十分である大きな理由は、その測定に伴う物理的な困難さが挙げられる。

河床飽和間隙水域の水文学的環境測定や生物の採集には、金属などのパイプを一定の深度まで打ち込み、直接測定や揚水を行う方法が多く用いられる。また、あらかじめ一定容積の土砂などをメッシュ性の素材で包み作成した籠などのトラップを埋設・回収する方法や、土砂を液体窒素の注入により凍結して、そのまま持ち出す方法などが考案されている^{7, 8)}。

筆者らは、北海道札内川で、国土交通省の河川維

持管理作業と連携し、一定量の堆積土砂を詰めて作成したトラップを河床内の最大 50 cm 深度に設置している。重機を利用することで、物理的に困難な作業が可能になり、同時に採水用の井戸を埋設することで、生息環境の測定も実施できる(写真1)。一定期間を置いた後に回収したトラップからは河床内の無脊椎動物が多数確認できる(写真1)。重機を用いた事業は頻繁に多数の河川で行われており、これらとうまく連携することで、人力では困難な河床内環境のモニタリングを比較的簡便に広域で実施することは可能であろう。一方で、事業の有無や規模・時期によって、得られる情報の質や量が大きく変わってしまう可能性がある。



写真1 トラップと重機による埋設作業、および採取された無脊椎動物

6. 簡易な地下環境評価

河床地下環境において河床に触れることなく間接的に評価できれば、その生態学的な理解や広域での環境モニタリングを大きく進展させるだろう。これに関わる技術の開発も札内川で行っている。前述したように河床内には多くの無脊椎動物が生息しているが、水生昆虫については、その生活史の一部を羽化成虫として陸上で過ごす。この羽化昆虫の群集構造や化学的な組織特性を調べることで、間接的に河床内の環境の一部を評価できるのではないかと考えた。

この際に最も重要な前提条件は、飽和河床間隙水域に生息する、いわゆる間隙種を特定しておくことである。これは、前述のトラップなどの設置と河床表面からの生物採取によって、ある程度可能である。札内川の場合は、ミドリカワゲラ科に属する一部のカワゲラ目の水生昆虫が主要な間隙種として特定されている(写真1の右下)。したがって、本種の成虫を継続調査することで、間接的に様々な河床環境の推定が可能となる。例えば、河畔で確認される本種の羽化量は、ある特定の箇所著しく高くなる傾向が示されている。この箇所は、夏場の水枯れの時期でも豊富な地下水が湧出する場所である。よって、飽和間隙水域の豊富さを羽化昆虫量が間接的に示していることが推察される。

一方で、羽化昆虫群集の採集には、一般的にマレーゼトラップが用いられる(写真2)。この手法はトラップが比較的高価であり、機動性に欠けるため、広域でのモニタリングに継続して使用することは困難である。そこで、粘着トラップを簡易的に設置した結果、マレーゼトラップで捕獲される間隙由来のミドリカワゲラ科の個体数を非常に高い精度で推定ができていた(図3)。この一連の手順が成熟すれば、比較的簡便に広域で間隙域の環境を間接的に把握できるのではないかと期待される。



写真2 粘着トラップ(左)とマレーゼトラップ(右)

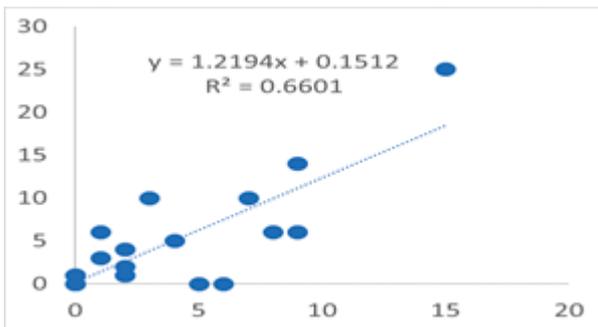


図3 粘着トラップ(横軸)とマレーゼトラップ(縦軸)での間隙依存種日捕獲個体数の関係

7. 新たな研究課題

河川生態系では、河川からの物質供給が河畔の消費者の個体数の変異や分布に強い影響を与える⁹⁾。この物質供給において前述した水生昆虫の羽化個体が重要な役割を果たす(図4)。多くの研究で、河川内の環境が河川由来の物質供給状況を変化させて、河畔の各種生物学的なプロセスに大きな影響を与えることが示されてきた。この評価においては、河川からの供給

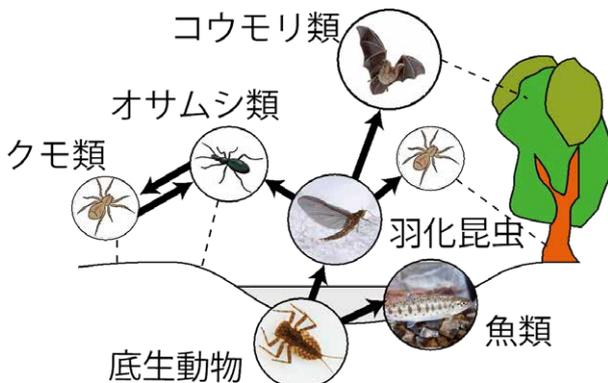


図4 河川と河畔の食物網の概念図

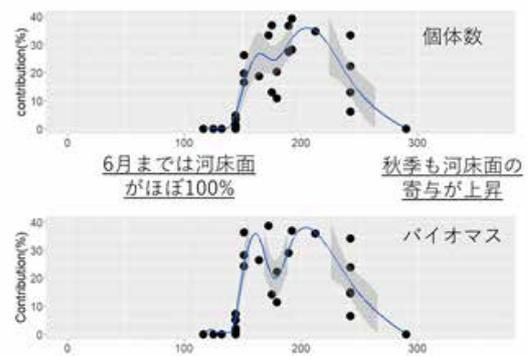


図5 間隙種の全羽化個体に占める割合の時間変化;横軸は1月1日(0)から12月31日(365)

は羽化個体総量としての観点から総合的に評価され、河川内部でのその空間的な起源や由来は未だ十分に明らかになっていない。

羽化水生昆虫には飽和間隙水域由来の個体も含まれている。しかし、このような陸域と河川食物網の中で、地下域の重要性は未だに明らかにされていない。筆者らの札内川での調査によれば、河畔横断方向に飛翔する羽化水生昆虫の中で、乾燥重量や個体数としておよそ40%の物質量が、河床間隙域から河畔への貢献として推定された(図5)。この貢献度を見落とせば、河川-河畔をつなぐ食物網を駆動する物質フローの保全の大きな妨げになる可能性がある。また、地下域由来の物質フローが陸上のどの消費者に取り込まれているのかを明らかにすることも重要である。

一方で、湧水河川と非湧水河川との底生動物の群集構造の差異に、河床間隙由来の種の生息数が明瞭に現れる可能性も示されている。これは、両河川タイプの河床堆積物および飽和間隙水域の生息場所としての質と量の差異に起因するようである。湧水河川では、流量変動による河床のかく乱や土砂移動が少なく、また、細粒土砂成分による目詰まりも起る。一方で、非湧水河川では、対照的に、通水性の高い飽和間隙水域が広く形成される。札内川の支流である湧水河川では、前述の間隙種であるミドリカワゲラ科の生息数が極めて低く、羽化成虫もほとんど確認できない。このように、両河川タイプの間には、水質や水温、流量などの物理化学特性の差異に加えて、飽和間隙水域生息場の物理的構造の違いもある。湧水・非湧水河川から成る河川ネットワーク構造の中で、飽和河床間隙水域の量・質を空間的に定量化していくことも必要である。

8. おわりに

湧出部の特性に注目することで、地下水や湧水を流域(河川)生態系のネットワーク構造の枠組みの中でより具体的に整理することができる。これまでの湧水や地下水に関わる河川の生態学的研究の対象として主なものは、湧水河川と非湧水河川の対比、および、飽和河床間隙水域と表面水の相互作用である。

ネットワーク上の湧水河川と非湧水河川の対比においては、水生生物種の遺伝構造との関連や、景観スケールでの移動分散を伴う生息場利用などが現在の研究課題である。飽和河床間隙水域の研究に関しては、環境測定や生物採集に伴う物理的な困難さが、研究の推進の障壁となっている。また、地下域の果たす各種生態系機能の保全の重要性から、その簡易な環境評価手法が求められている。間隙種として特定した水生昆虫の羽化成虫に注目することで、間接的かつ比較的安価な環境評価が可能になると期待が持てる。また、間隙水域由来生物からの河川・河畔食物網における貢献度の推定、そして、その物質フロー受益者の解明が今後求められる。また、湧水・非湧水河川の対比と飽和間隙水域生息場の量・質という二つの観点を結び付けるような複合的な研究への取り組みも必要である。そして、河川生態系における地下水・湧水の緒機能を広域で評価し、その保全を積極的に取り入れた河川整備を実施していくことは極めて重要である。

9. 引用文献

- 1) Brown, L. E., Hannah, D. M., & Milner, A. M. (2003). Alpine stream habitat classification: an alternative approach incorporating the role of dynamic water source contributions. *Arctic, Antarctic, and Alpine Research*, 35(3), 313-322.
- 2) Uno, H., & Power, M. E. (2015). Mainstem-tributary linkages by mayfly migration help sustain salmonids in a warming river network. *Ecology letters*, 18(10), 1012-1020.
- 3) Boulton, A. J., Datry, T., Kasahara, T., Mutz, M., & Stanford, J. A. (2010). Ecology and management of the hyporheic zone: stream-groundwater interactions of running waters and their floodplains. *Journal of the North American Benthological Society*, 29(1), 26-40.
- 4) Stanford, J. A., & Ward, J. V. (1988). The hyporheic habitat of river ecosystems. *Nature*, 335(6185), 64.
- 5) Kohzu, A., Kato, C., Iwata, T., Kishi, D., Murakami, M., Nakano, S., & Wada, E. (2004). Stream food web fueled by methane-derived carbon. *Aquatic Microbial Ecology*, 36(2), 189-194.
- 6) Stanford, J. A., & Ward, J. V. (1993). An ecosystem perspective of alluvial rivers: connectivity and the hyporheic corridor. *Journal of the North American Benthological Society*, 12(1), 48-60.
- 7) Boulton, A. J., Dole-Olivier, M. J., & Marmonier, P. (2003). Optimizing a sampling strategy for assessing hyporheic invertebrate biodiversity using the Bou-Rouch method: within-site replication and sample volume. *Archiv für Hydrobiologie*, 156(4), 431-456.
- 8) Scarsbrook, M. R., & Halliday, J. (2002). Detecting patterns in hyporheic community structure: Does sampling method alter the story?. *New Zealand Journal of Marine and Freshwater Research*, 36(2), 443-453.
- 9) Baxter, C. V., Fausch, K. D., & Carl Saunders, W. (2005). Tangled webs: reciprocal flows of invertebrate prey link streams and riparian zones. *Freshwater biology*, 50(2), 201-220.