



風化花崗岩山地源流域間の渓流水質構成の相互比較

京都大学農学研究科

勝山正則・大手信人・速水香奈

Kafuyama@kais.kyoto-u.ac.jp

1. はじめに 森林の公益的機能—水質形成・水質浄化

小流域での水文・水質観測

- これまでに多くの知見が蓄積
- 比較的少人数で詳細な観測が可能
- 観測によって情報を得る（仮定が少ない）

現象の一般化が課題

- 流域間の比較 / 時空間スケールの変動
- ひとつの小流域観測の知見が、他流域に通用するか？

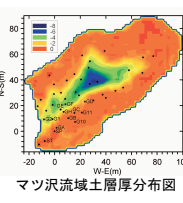
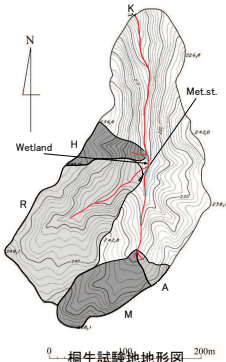
目的

- ひとつの流域で明らかになった渓流水質形成プロセスは他流域にも通用するか？
- 流域間の水質構成の違いは、各流域のどのような特性を反映するか？

2. 観測流域概要

滋賀県東部 桐生水文試験地の概要

母材 風化花崗岩
 年平均降水量 1639.9mm (1972-2003年平均値)
 年平均気温 13.6°C (1997-2003年平均値)
 植生 ヒノキ人工林
 アカマツ(源頭部流域、マツ枯れ被害)
 広葉樹(河道沿い+源頭部)
 9.23
 河道勾配
 備考 土砂流出防止のための空石積堰堤が多数
 流域中央部の河道沿いに湿地が存在(堰堤の堆砂地)



マツ沢流域地下水帯の区分
 ● SGW...流域末端の恒常的地下水
 深度 100, 200, 400cm 程度の3層の地下水を採取
 ● IGW...一時的地下水
 降雨時には基岩面上に水位が発生し、降雨後もある程度の期間水位が残る。特に簡易貫入試験で判定された基岩面以下で観測している GC 地点ではほぼ年間を通じて水位が存在
 ● HGW...降雨時に土層の薄い斜面部の土壌・基岩境界面上で発生する飽和側方流。降雨後速やかに水位が消失

3. 方法

渓流水質形成機構の解析には主成分分析 (Principal Components Analysis; PCA) を組み合わせた End-Members Mixing Analysis (EMMA; Christophersen et al. (1990)) を用いる
 渓流水は地下水などの流域に存在する source water の混合によって形成されると仮定し、両者の水質を結びつける手法。2 種類の水質を軸に取り、各 source water と渓流水のトレーサー濃度をプロットした Mixing diagram を用いて解析を行う
 PCA を組み合わせる利点
 EMMA では「どの地点の水が End-Member か？」と、「End-Member の個数はいくつか？」という 2 点をいかに客観的に決定するかが重要な問題
 後者の方法として、PCA をあわせて用いる (Christophersen and Hooper, 1992)
 この手法では複数の水質項目を同時に考慮することにより、End-Member の必要最低限の個数を決定し (Christophersen and Hooper, 1992; Kendall et al., 1999; 勝山ら, 2004)、混合プロセスをより客観的に評価することが可能 (Brown et al., 1999)

流域間の渓流水質構成を比較する手法として Hooper(2003) の手法を用いる
 ひとつの Reference Site の Mixing Diagram に、他の Test Sites の渓流水質を投影し、流域間の渓流水質形成パターンの違いを比較する方法
 本手法の利点 (PCA だけを用いた解析 (e.g. Worrall et al., 2003)) との違い
 複数の流域に対して適用することで、渓流水質が同じメカニズムでコントロールされているか、あるいは流域間に相違があるかを調べるのが可能
 PCA だけを用いた解析には全地点で多くのデータが必要

Name	Area (ha)	ratio (%)	Sampling Period	Sample Size	Remarks	
マツ沢	M 0.68	11.4	Streamwater	1996/6-2003/12	475	降雨時観測含む
			Groundwater	1996/6(2001/6)-2003/12	46-179	15地点 平均値
			Rainfall	1996/7-2003/12	163	1地点 平均値
			Throughfall	1996/7-2003/12	326	2地点 平均値
桐生	K 5.99	100	Streamwater	2000/6-2003/12	72	主に平水時
			Streamwater	2002/3-2003/12	31	主に平水時
			Streamwater	2002/3-2003/12	31	主に平水時
赤壁	A 0.086	1.4	Streamwater	1999/3-2003/12	103	主に平水時

4. 結果と考察

4.1. マツ沢渓流水に対する主成分分析の適用

主成分No.	1	2	3	4	5
固有値	3.2	1.6	0.4	0.3	0.2
寄与率	53.4	27.8	6.9	5.9	3.3
累積寄与率 (%)	53.4	81.2	88.1	94.1	97.5

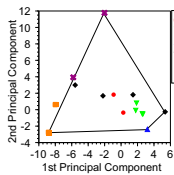
マツ沢流域渓流水の Na⁺, Mg²⁺, Cl⁻, NO₃⁻, SO₄²⁻, SiO₂ の 6 種類の水質データセットに対して PCA を適用

- 固有値が 1 以上の主成分のみを考慮する "rule of 1" (e.g. Hooper, 2003) に従えば第 2 主成分まで
- 第 3 主成分までを考慮すれば約 90% が説明可能

※主成分の累積寄与率：もとのデータが持つ情報量のうち、その主成分までで説明される情報量の割合

End-Member は 3(2+1) から 4(3+1) 必要

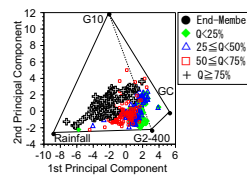
4.2. マツ沢流域 (Reference Site) の渓流水質形成メカニズム



End-Member の選定

- 地下水・降水の観測濃度を、渓流水の平均濃度および標準偏差を用いて基準化
- 渓流水濃度データの相関行列の固有ベクトルを用いて直交変換し、Mixing Diagram に投影

EM (End-Member)
 Rainfall (林外雨)
 G2-400 (SGW 最深部)
 GC (基岩浸透地下水の影響を受けた TGW)
 G10 (HGW)



マツ沢流域の渓流水質形成メカニズム

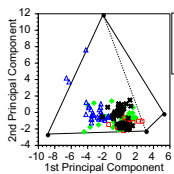
- Rainfall, G2-400, G10 を結ぶ三角形内にほぼすべての点がプロットされ、GC をあわせるとすべての点が含まれる

End-Member は 3 or 4

- 基岩浸透地下水 (GC) と飽和帯最深部 (G2-400) の組成は比較的近い
- 恒常的地下水は一時的地下水と比べてばらつきが小さい

各地点の地下水も End-Member の混合

4.3. 他流域 (Test Sites) の渓流水質形成メカニズム



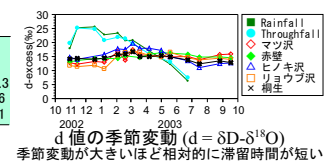
Test Sites の渓流水質をマツ沢流域の Mixing diagram に投影

- 全流域でマツ沢の Mixing diagram で説明可能
- 流域ごとにプロットされる位置が異なる

リョウフ沢 → 赤壁 → ヒノキ沢
 ← 桐生 →
 恒常的飽和帯 基岩地下水 ←→ 降水 → 飽和側方流

流域間の水文特性の比較

Catchment	M	K	R	H	A
雨量 ¹⁾ (mm)	1342				
流量 ¹⁾ (mm)	277.7	527.1	421.1	86.8	401.3
減水係数 α ²⁾ (d)	0.04	0.05	0.05	0.1	0.06
直接流出 ³⁾ (%)	3.1	12.8	10.2	2.7	12.1



季節変動が大きいほど相対的に滞留時間が短い

ヒノキ沢：流量 少、減水係数 / 同位体変動 大
 ⇒ 渓流水の滞留時間が相対的に短く、降水・飽和側方流に近い

リョウフ沢・赤壁：流量 大、減水係数 / 同位体変動 小
 ⇒ 渓流水の滞留時間が相対的に長く、安定した地下水帯から供給される

桐生：流量が最大、減水係数・同位体変動 中間
 ⇒ 各支流の特性を統合。両者の寄与が比較的均等

Mixing Model の誤差評価

正規化平均自乗誤差

(relative root-mean square error; RRMSE)

$$r_j = \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_{ij} - \bar{x}_j)^2}}{n \cdot \bar{x}_j}$$

	SiO ₂	Na ⁺	Cl ⁻	NO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻	Mg ²⁺
3 components						
M	0.6	1.0	1.5	12.3	5.2	23.4
A	1.2	1.8	3.7	34.7	14.6	79.2
R	3.3	3.6	13.8	42.5	27.7	74.1
K	2.1	3.5	6.0	58.1	79.3	81.1
H	1.2	2.4	4.2	34.9	17.2	35.6
4 components						
M	0.9	1.9	2.6	9.7	3.9	38.2
A	1.1	3.1	5.3	28.4	10.5	123.1
R	7.8	8.8	9.1	87.7	44.3	40.4
K	2.6	2.5	4.6	63.4	99.0	55.6
H	1.1	1.5	2.9	39.9	22.2	23.0

5. 結論

- 複数の風化花崗岩山地源流域間で渓流水質構成を比較した
- Hooper(2003) による手法で、Test Sites は Reference Site の水質形成に関する知見から概ね説明された
- 流域間の渓流水質形成機構の違いは滞留時間の短い土壌由来成分と、長い基岩由来成分の寄与の差に起因し、流域の水文特性と密接に関わっていた
- 本研究の手法は水文化学現象のスケールアップ、知見の一般化を図る上で有効なツールとなる

引用文献、参考 URL

Brown, V. A., McDonnell, J. J., Burns, D. A. and Kendall, C. (1999) The role of event water, a rapid shallow flow component, and catchment size in summer stormflow. *J. Hydrol.*, 217, pp. 171-190.

Christophersen, N. and Neal, C. (1990) Linking hydrological, geochemical, and soil chemical processes on the catchment scale: An interplay between modeling and field work. *Water Resour. Res.*, 26, pp. 3077-3086.

Christophersen, N. and Hooper, R. P. (1992) Multivariate analysis of stream water chemical data: The use of principal component analysis for end-member mixing problem. *Water Resour. Res.*, 28, pp. 99-107.

Hewlett, J. D. and Hibbert, A. R. (1967) Factors affecting the response of small watersheds to precipitation in humid areas. *International Symposium on Forest Hydrology*, Soppe, W. E. and Lull, H. W. (Eds.), Pergamon Press, Oxford, pp. 275-290.

Hooper, R. P. (2003) Diagnostic tools for mixing models of stream water chemistry. *Water Resour. Res.*, 39(3), 1055, doi:10.1029/2002WR001528

Katsuyama, M., Obie, N. and Kobashi, S. (2001) A three-component end-member analysis of streamwater hydrochemistry in a small Japanese forested headwater catchment. *Hydrol. Process.*, 15, pp. 249-260.

勝山正則, 大手信人, 小杉賢一朗 (2004) 風化花崗岩山地源流域の渓流水 NO₃⁻ 濃度形成に対する水文過程のコントロール. *日林誌*, 86, pp. 27-36.

Kendall, K. A., Shanley, J. B. and McDonnell, J. J. (1999) A hydrologic and geochemical approach to test the transmissivity feedback hypothesis during snowmelt. *J. Hydrol.*, 219, pp. 188-205.

Worrall, F., Burt, T. and Adamson, J. (2003) Controls on the chemistry of runoff from an upland peat catchment. *Hydrol. Process.*, 17, pp. 2063-2083.

http://www.cof.orst.edu/cof/featershd/shortcourse/index.htm

http://www.blucorn.kais.kyoto-u.ac.jp/katsu/EMMA.html