

水循環と地下生命圏—富士山地下圏を例に

静岡大学理学部・創造科学技術大学院
加藤憲二・瀬川琢也・永翁一代

柿田川を涵養する湧水

日量100万トンにも達すると見積もられる膨大な量の地下水が、静岡県駿東郡清水町の国道1号線の直下ともいえる位置からこつ然とわき出し、20メートルを超える川幅を形成して滔々と流れる湧水河川柿田川。その地下水は、柿田川に湧出する地下水に限らず富士山地下圏全体で、中性で海水などと比べると値は低いものの一定量の有機物を含むとともに、①湧き出したとき既に飽和濃度に近い酸素を含んでいる(表1. 長岡, 2006; 吾郷, 2007; 小坂, 2009; Segawa, 2012)。そして、②水中の細菌数は驚くほど少ないことが私たちのこの5年あまりの研究で明らかになってきた。私たちの限られた地下水研究の経験に照らしても酸素濃度といい、細菌数といい、それはにわかに信じがたい値を示すものであった。その地下水が、およそ15年の地下での滞留時間を経て地表に湧出してきたといわれている(土, 2007)。地下圏には太陽光は届かない。分子状酸素の供給源である光合成が行われなため水中に溶存した酸素は消費される一方で、やがて枯渇するはずである。膨大な量の湧水は一体どこで酸素を吸収し、地表に湧してきたのであろうか？

一方、地下圏の微生物について今まで得られている知見の多くは海底を中心とした堆積層を対象とした研究から得られている。陸域地下圏については汚染地下水の研究の他はカルスト地形での微生物に関する研究例があるが(Griebler and Lueders, 2009; Wilhartitz *et al.*, 2007)、カルスト湧水中の細菌密度は10の4乗程度と報告されている。柿田川へ流れ出る湧水を涵養する地下圏は火山性の地質であるとはいえ、水質の化学成分は決して細菌の存在を抑制する

ものであるとは見なされないのに、なぜ知られているような地下圏での密度(図3)より二桁も小さい細菌数しか認められないのか？

このふたつの疑問を解こうとすると<富士山地下圏には一体どれほどの量の水が貯蔵されており>、<どのような過程を経て地表にあらわれてくるのだろうか>という問題に直面する。これらはそもそも水文科学の中心課題の一つではないかと思われる。門外漢の私たちには取り組みがたい課題であるが、全体のイメージを得ようと思い、一つ取り組んだ現場観測がある。まずはそのことを紹介し、ついで私たちが考えている地下圏での水と岩石の相互作用の間に微生物が関与するだろうという新しい視点を紹介したい。

富士山地下圏の水は駿河湾にも湧きだしている

地下水のことなど全くの門外漢である私たちが、柿田川の水は一体どのようなプロセスを経てわき出しているのかを知りたいという思いでたどり着いたのは、登坂先生のモデル(P8~P11を参照されたい)を応用して富士山麓の地下水流動モデルを作っていた地圏環境テクノロジーの西岡さんや森さんたちである。単純に言えば地形と地質、降水と蒸散、土地利用から地下へ浸透した水の流速が図示されている。環境省の報告書に掲載されている富士山地下圏での地下水流動を示す図1を眺めて、湧水地点との重なり具合や富士五湖の位置などいくつも納得の行くことがあった。しかし、最も興味を引かれたのは柿田川の流れ出す位置よりもさらに海岸線側から、そして駿河湾の中までも推定される地下水の流れは張り出しているのではないかと、という素朴な疑問である。その位置が田子ノ浦沖であったことも興味深い。

表1.富士山麓に湧出する地下水の物理化学性状.

Area	Date	Temp (°C)	pH	EC (μS/cm)	Eh (Pt) (mV)	DO (mg O ₂ /L)	DOC (μmol C/L)	NH ₄ ⁺ (mg/L)	NO ₃ ⁻ (mg/L)	PO ₄ ³⁻ (mg/L)
東麓テフラ層	2005. 8. 9	12.2	7.12	110	330	7.79	8.0	0.37	2.08	0.38
	2010. 11. 22	14.1	8.01	163	453	11.25	50.6	13.40	7.59	0.41
東南麓溶岩流	2004. 10. 31	13.3	5.65	62	363	6.77	0.8	1.01	0.83	0.28
	2011. 7. 2	15.7	8.47	169	560	11.21	28.1*	7.80	6.65	1.29
南麓溶岩流	2009. 5. 24	14.2	6.06	119	212	7.65	10.7	0.11	0.50	0.31
	2011. 11. 22	18.1	7.39	257	580	12.17	20.0	2.95	67.40	1.58
西麓溶岩流	2009. 4. 4	10.9	5.69	76	319	6.77	7.8	0.36	3.26	
	2011. 11. 6	15.7	8.47	180	560	10.97	34.1	18.80	11.00	n.d.

はこのような広大な物質循環系があることをしっかり認識しておく必要があるのではないだろうか。地下水がつなぐ地下圏を含めて地球化学過程を考える必要があるだろう。

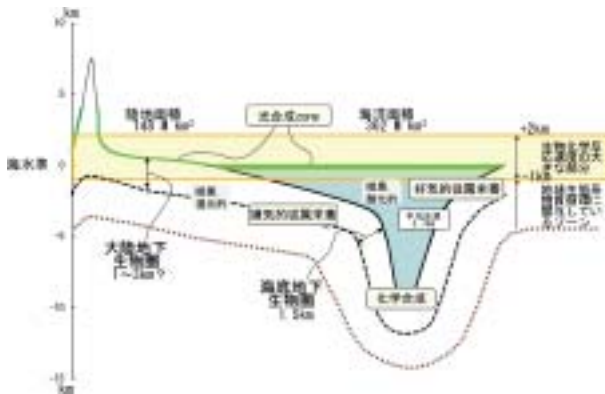


図5. 地球生命圏のイメージ。

- 注1. ここまで一般になじみのある細菌という語句で表現した生物群は、実は原核生物とくくるのが正しい。これは遺伝子により明らかにした系統進化関係から全生物群を三つの大きな生物群（超界；ドメイン）のうち二つをくくったものである。
- 注2. 南イタリアの火山島の地下水に含まれる細菌の遺伝子解析から熱水系の地下水脈とそうではない冷水系の水脈があることを示唆した論文が最近発表された(Bucci *et al.*, 2011)。似た考え方に基づく研究であると言えるが、地下水深度について言及しているものではない。

謝辞

卒業研究で汗を流してくれた皆さん、研究を支援してくださったリバーフロント研究所竹村代表理事他の皆様に感謝します。

文献

- 吾郷友基, 2007, 富士山麓湧水群における地下水環境と細菌の分布. 静岡大学理学部理学部地球科学卒業論文, 638, pp. 38.
- Bucci, A., Naclerio, G., Allocca, V., Celico, P and Celico, F., 2011, Potential use of microbial community investigations to analyse hydrothermal systems behaviour: the case of Ischia Island, Southern Italy. *Hydrological Processes*, 25, 1866-1873.
- Colwell, F.S., 2001, Constraints on the distribution of microorganisms in subsurface environments. In *Subsurface Microbiology and Biogeochemistry*. Fredrickson, J.K., and Fletcher, M. (eds). New York: John Wiley, pp. 71-95.
- Ghiorse, W.C. and Wilson, J.T., 1988, Microbial ecology of the terrestrial subsurface. *Advance in Applied Microbiology*,

33, 107-172.

Griebler, C., and Lueders, T., 2009, Microbial biodiversity in groundwater ecosystems. *Freshwater biology*, 54, 649-677.

Harvey, R.W. and George, L.H., 1987, Growth determinations for unattached bacteria in a contaminated aquifer. *Applied and Environmental Microbiology*, 53, 2992-2996.

加藤憲二・永翁一代, 2005, 地下生物圏. 地学雑誌, 1000号記念特別号114, 434-444.

Kato, K., Nagaosa, K., Kimura, H., Katsuyama, C., Hama, K., Kunimaru, T., Tsunogai, U. and Aoki, K., 2009, Unique distribution of deep groundwater bacteria constrained by geological setting. *Environmental Microbiology Reports*, 1, 569-574.

小坂正道, 2009, 富士山地下圏における地下水と岩石の相互作用と細菌の分布. 静岡大学理学部地球科学卒業論文, 692, pp. 45.

光谷大樹, 2012, 溶岩の地下水と原核生物への影響-バッチ培養による解析. 静岡大学理学部地球科学卒業論文, pp. 39.

長岡篤子, 2006, 柿田川および富士山麓湧水の水環境と細菌の分布. 静岡大学理学部理学部地球科学卒業論文, 633, pp. 45.

西岡哲, 2010, 国土の水資源・環境基盤の構築に向けて一三次元地質情報基盤情報の必要性一, 地質ニュース675, 39-44

奥村卓也, 2010, 富士山地下水は駿河湾沿岸の微生物生態系に影響するか. 静岡大学理学部地球科学卒業論文, 706, pp. 60.

Parkes, R. J., Cragg, B. A., Bale, S. J., Getliff, J. M., Goodman, K., Rochelle, P. A., Fry, J. C., Weightman, A. J. and Harvey, S. M., 1994, Deep bacterial biosphere in Pacific Ocean sediments, *Nature*, 371, 410-413.

瀬川琢也, 2010, 富士山西南麓湧水群における水環境と原核生物の特徴. 静岡大学理学部地球科学卒業論文, pp. 53.

Segawa, T., 2012, Chemical properties of springs and distribution and diversity of prokaryotes at the foot of Mt. Fuji. Master degree, Graduate school of Science, Shizuoka University, pp. 53.

土隆一, 1992, 富士山のどこに地下水があるのか—その知られざるメカニズムを探る. 富士山—その自然のすべて—(諏訪彰編), 同文書院, 225-249.

Wilhartitz, I., Mach, R. L., Teira, E., Reinthaler, T., Hernd, G.J., and Farnleitner, A.H., 2007, Prokaryotic community analysis with CARD-FISH in comparison with FISH in ultra-oligotrophic ground- and drinking water. *Journal of Applied Microbiology*, 103, 871-881.

山田誠・大沢信二・風早康平・安原正也・高橋浩・網田和宏・馬渡秀夫・吉川慎, 2008, 同位体水文学的手法による火山地下水流同系へのマグマ起源CO₂の混入過程の研究-阿蘇火山を例にして-. 月刊地球 号外60, 114-120.