

# 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 <sub>2</sub> /L)	DOC (μmol C/L)	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> (mg/L)	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> (mg/L)	PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> (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.

1960年代70年代の戦後の高度成長期にヘドロで汚れきった田子ノ浦の水質の回復に、海底下から湧き出す湧水が関与してはいなかっただろうか。

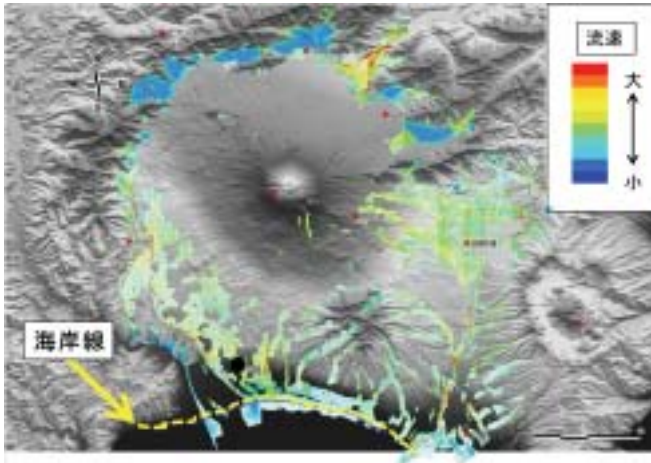


図1. 地質と地形から推定される地下水の流速  
(株) 地図環境テクノロジーによる)。

まず、東京大学の観測船淡青丸の航海で駿河湾沿岸への地下水の湧きだしの探査の手がかりをつかむことを試みた。2008年2月のことである。得られた結果が図2に示されている。日表流量が富士川の546万トンはおろか、柿田川がその最下流域で合流する狩野川の155万トンの半分にも満たない潤井川が流れ出る田子ノ浦沖で、最も低い塩分が観測されたのである。図1と比べてみても分かる通り、地下水が海水中へと流出している可能性の高いことが示唆される。



図2. 駿河湾表面海水中の塩分。

このあと何度か私たちは漁船による田子ノ浦沖観測を試みた。そして2009年11月の海況が穏やかな日に、ついに海底からの淡水の湧出を確認した。岸からおよそ200mのSt.1-8では水深80mで35.3あった塩分が95mを超えて急速に低下し、95.5mではなんとメ

ーターは16.0という値を示した。明らかに“辛い水”が海底から湧き出している。この水の濁度は異常に高く、海底の砂粒子を巻き上げていることが示唆された。さらに驚くべきことには、この水は酸素をほとんど含んでいなかったのである。このような水が発見された海底95.5m地点はGPSでの位置特定の結果から、2~30メートルの範囲に限定されることが予想された。地下水あるいは水そのものが還元であれば海水中ではしばしば生物生産の律速となるリンの供給があり得るのではないかと考えられる。私たちの予備的な実験で海水に地下水を混合させた系では細菌の増殖が促進される可能性が示唆された(奥村, 2010)。地下水が流出する日本列島の沿岸域では土地土地で高い漁獲量が得られていたり、昆布などの良好な地域であることが西岡さんたちのチームの研究成果でも示唆されている(私信)。海底からの淡水性の湧出水が酸素を含んでいないことについては、生物バイオマスの大きな海底の砂泥中を通過する過程で酸素が消費され尽くしたのではないかと考えられる。

駿河湾田子ノ浦沖での海底からの淡水が湧出する地点の発見は登坂モデルを用いた地下水流動解析の信頼度の高さを私に強く印象づけた。と同時に、我が国のような急峻な地形からなる環境では地表で確認される総量よりもさらに多量の地下水が湧出していることを確信させた。

### 地下には膨大な生命圏が広がっている

地下圏の微生物研究は地下水汚染が問題となった1970~80年代に欧米ではひとつのピークがある(Ghiorse and Wilson, 1988; Harvey and George, 1987など)。この時期の研究は微生物培養に基づく従来の手法で汚染の理解と微生物による環境修復の可能性に関する研究が主に行われた。1990年代に入ると環境中の微生物研究は転機を迎える。分子生物学的な手法を応用して、手間のかかる培養過程を経ることなく環境中に存在する微生物群集の構成を明らかにすることが可能となった。このような研究手法の発展を受けて地下圏、特に海洋底地下堆積層における地下圏微生物研究がこの10数年間で大いに進み、今まで未知であった微生物の生態が明らかになりはじめている。図3は地下圏における細菌(注1)の存在量を示したものである。なんと海や陸の地下では100mを超えても1mlあたり10の6乗、100万もの細菌の存在がDNAの検出によって確認されている。この数の細菌すべてが活発に活動しているとは考えにくい。仮にその3分の一としても海水や湖水の中とほぼおなじ密度であり、地下水で細菌や古

細菌がさかんに活動している可能性をうかがうことができる。地下水が湧出するまでの水の履歴を考える上で、岩石と地下水が作り出す環境の中で細菌が果たす役割を無視することはできないと私たちは考えるようになった。では富士山地下圏ではどうだろうか？

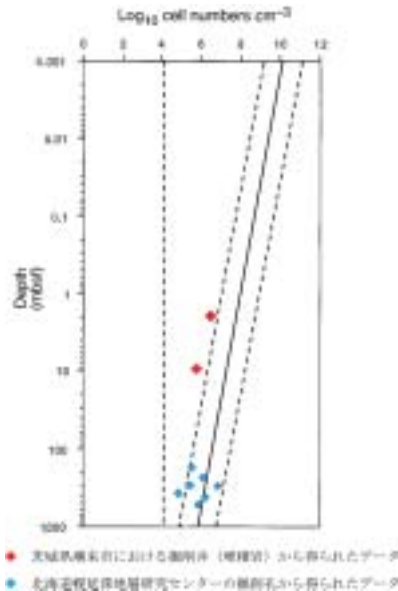


図3. 地下圏中の細菌密度 (Parkes et al. 1994 を改変).

### 10の3乗

驚くべきことに私たちが5年以上にわたって調べた限り富士山麓に湧出する水の中に含まれる細菌数は驚くほど少ないことが明らかになった(図4)。

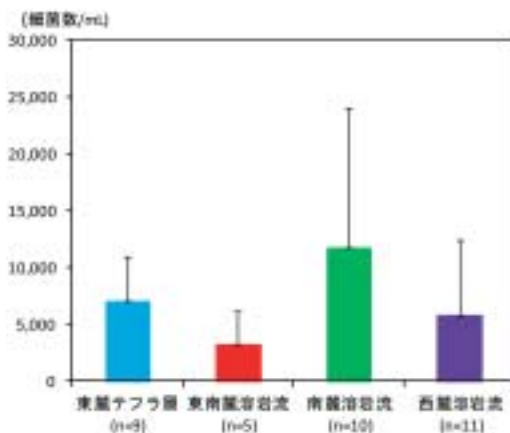


図4. 富士山麓に湧出する地下水中の細菌数.

水1mlの中に細菌が1000のオーダー、10の3乗というのは自然界で観測される細菌数としてはきわめて少ない値である。浄化された水道水中にもしばしばそれ以上の細菌が存在することが知られている。富士山の地下水中ではなぜこれほどに細菌数が少ないか？表1に示した地下水の物理性状や細菌の増殖に必須のリンや窒素濃度などからはどうも説明が

つかない。まだ確たるデータが得られていないが、富士山麓いずれの地でわき出している湧水も飽和度に近い酸素濃度を含んでいることも関連して、溶岩流から流れ出していることがその原因として考えられるのではないだろうか。細菌数に関しては間隙の多い溶岩が細菌をトラップする効果があるように思われる。平成23年度の卒業研究で光谷大樹君は、黒く酸化した溶岩、赤い還元状態の溶岩、多孔質の溶岩の3種類の溶岩を富士宮市大淵から採取し、これらが現場上流の井戸から採水した水の中の細菌数の変化にどのように影響するかを追跡した。効果は岩石へ細菌が吸着することによってもたらされる細菌数の減少のほか、岩石から溶出する化学成分が細菌の増殖をもたらし作用もあり正負の要因を検討する必要があるが、約ひと月の培養実験から多孔質の溶岩には細菌数を減じる効果があることが示唆された(光谷, 2012)。

### どのような細菌や古細菌がいるか

前述した通り、地下圏では水中の酸素は消費される一方でやがて枯渇する。酸素がない環境下では微生物による還元反応が進む。酸素が枯渇しきる直前の環境から脱窒反応として知られる硝酸還元、そして鉄やマンガンの還元反応が進む。海水のように硫酸を多量に含む水中では硫酸還元反応が海底泥中で卓越し、最も還元的な環境下では二酸化炭素からメタンを生成するメタン生成が行われることが知られている。このように原核生物が持つ生存のためのエネルギー生産手段の多様性は、とりもなおさず地下圏が原核生物の世界であることを物語っている。

しかしながら富士山麓から湧出する地下水は表1にも示される通り、いずれの場所でも酸素を十分に含んでいる水である。どこで地下水が酸素を吸収するのだろうか。水の通り道とそこに分布する細菌との間には関係があるだろうということは十分考えられる。

溶岩流の厚さおよそ150~200mを超えた地下深部が酸素に満ちていることは考えにくいので溶岩流のどこかで大気から酸素が地下水に溶け込んでいると考えてよいのではないだろうか。そうすると富士山地下圏から湧きだす湧水の由来は、酸素を幾分含んだ浅い溶岩流を流れるものと酸素が枯渇した深い地下圏に由来するものとに分けて考えることができるであろう。湧水はこれら2種類の水が混合して地表に湧出したものであると考えられるが、その混合比はどうであろうか。地下水の滞留時間としてわれわれが知りうるのは、その総和の平均値である。ある時に湧き出している水は、天水から供給される若い

水と、地下圏に長時間貯蔵され岩石との相互作用が進んだ、年数を経た水との混合であるが、その割合はどうなのか。また地下圏で水はどのような岩石との相互作用を経て、その過程でどのように微生物反応が進行したのか。そのことが湧水にどのように反映して、その水が地表の生態系に何らかの影響をおよぼすことはないのだろうか。湧水中の細菌を調べ始めた私たちの関心はこのような形で広がっていく。

#### 微生物が運ぶメッセージ／細菌という指標

原核生物の生理生態学上の特徴は、大きさ1～2  $\mu\text{m}$ ほどの単細胞生物で、増殖は二分裂によるクローン細胞の増殖ですすむ。遺伝情報はDNAにストックされ、核がないためむき出しの形で細胞の中に折り畳まれている。私たちヒトのように個体は多細胞からなり有性生殖によって増殖する真核生物と違って、遺伝的にあらかじめ決められた寿命と言う概念は当てはまりにくい。窒素やリンあるいは有機物などのエネルギー生産に必要な条件のそろい具合で異なった微生物群が活性を發揮し、増殖する。その環境条件が悪くなると代謝活性は低下してある時間経過の後には飢餓状態に陥る。それから遺伝情報の本体を担うDNAも壊れ始め、死に至る。地下圏では岩石に吸着するか、地下水に浮遊して存在するが、多くの場合遊泳力は持たない。かりに遊泳に必要な鞭毛を持っていても一世代の間に遊泳できる距離は高々数メートルにすぎない。従って地表で湧水として湧き出した水の中にいる細菌は地下のいずれかの深度から運ばれてきたものだと考えることができる。このことを踏まえて次に進みたい。富士山麓の湧水中に含まれる細菌の数は非常に少ないと先ほど書いたが、その一方で、遺伝子の解析からどのような細菌や古細菌がいるかと調べてみると十分に多様な微生物の世界が現れてきた。

まず、酸素濃度が十分に高い湧水中から、酸素があると生き残れない絶対嫌気性細菌の仲間が発見された (Segawa, 2012)。上で説明したように、遺伝子が検出されたということはその細菌は生きていて、あるいは少なくとも活性を失ってからそれほど長い時間は経過していないことが示唆される。岩塩の中などの非常に特殊な環境をのぞいて環境中のDNAが長時間分解をまぬがれて残存することは考えにくいことから、そのように推察される。つまり、地表にわき出した湧水は、酸素のない世界からのメッセージを含んでいた可能性があることになる。しかし、地下水が通ってくる過程で水の中ではなく周囲の水の流れがきわめて少ない堆積岩中に存在していた細菌が流れに取り込まれた可能性は否定できない。

一方、古細菌は細菌の一、二割ほどの数でしか存在しないがその中には40℃以上の高温環境下に分布する好熱細菌の遺伝子が含まれていた。地温勾配を100mにつき3～4℃ (Colwell, 2001) とすれば湧水の温度を15℃として地下6～800m以深に分布していた古細菌が地下水の動きとともに地表へと運ばれたことになる。この場合は地下水の通り道の岩石中であっても生存に好適な温度によって示唆される深さの情報に変わりはない。この古細菌は地下深部からのメッセージであると言えよう。湧水の化学成分を分析することで、地下での履歴を知ることができる。京都にある地球総合研究所の中野教授は、ストロンチウムの同位体を測定することで地下での水と岩石との相互作用の度合いについての情報が得られるという興味深い知見を手がかりに地下圏研究を進めておられる。しかしながら、そのときまでの岩石と水の相互作用の相対の結果である化学分析だけでは、水の由来を示唆するような情報を見いだすことは容易ではない。これに対して、私たちは湧水中に含まれる細菌の遺伝子解析から地下水の深度情報の一端を示すことができるのではないかという可能性を見いだした (注2)。また最近になって、好熱細菌、超好熱細菌の検出を熱水地下水路の確認手段として用いた研究例も報告されている (Bucci *et al.*, 2011)。

#### 地表生態系と地下圏のつながりー水循環のもうひとつの顔

富士山と同様の大きな火山の裾野から豊富な湧水がわき出す阿蘇山麓では、同位体の研究からマグマ由来のCO<sub>2</sub>が地下水の中に認められることが報告されている (山田ほか, 2008)。また私たちの研究では北海道北部の堆積層からなる地層の地下水の中では深部で微生物作用を受けたと考えられるメタン (CH<sub>4</sub>) が含まれることが示された (Kato *et al.*, 2009)。この地層はかつて海であった時代に堆積した植物プランクトンである珪藻の遺骸が主な成分である。つまり、かつて海洋の表層で光合成し増殖した珪藻が海底へ向かって沈降する過程で分解されなかった細胞成分やガラス (ケイ酸化合物) の殻からなる地層だということである。海の生態系で一次生産された有機物の残部が、地下圏という環境下で改めて微生物作用によって分解され、変換されて再び地表へ戻ってきたことになる。私たちが生命活動を営む地表生態系と地下圏は物質循環の観点からも見事につながっていることが示されている。かつて堆積した有機物が圧力と熱変成をうけて生成されたものを化石燃料として利用した結果生じているCO<sub>2</sub>問題の裾野に

