

富士山流域圏における水循環と生態系の 保全に関する研究

Studies on the water cycle and ecosystem conservation in Mt. Fuji watershed

河川・海岸グループ 研 究 員 伊藤 将文
生態系グループ 研 究 員 川口 究
リバーフロント研究所 主席研究員 内藤 正彦
生態系グループ 研 究 員 竹本 進

本研究では、富士山流域圏を対象として、地下水の利用と保全、地下水流動を視野に入れた水域環境（生態系）の保全と河川管理のあり方を考える新たな評価・分析手法を提案することを目的に、地下水の滞留時間、動態、湧出状況、微生物生態系に関する情報の収集・分析等により、総合的な水循環研究を行った。また、柿田川生態系研究会、関係団体（NPO）・行政機関等と相互に調査・研究成果を情報交換することにより、地域共有の知見の蓄積を試みた。

キーワード：富士山流域圏、柿田川、電気伝導度、溶存酸素量、細菌数

This study involves comprehensive hydrological circulation research, including collection and analysis of information concerning detention time, dynamic state, eruption and a bacterial ecosystem of groundwater, targeting proposed new evaluation and analysis methods to conserve the aquatic environment (ecosystem) and river management of Mt. Fuji watershed, considering the use, conservation, and flow of groundwater at the same time. Furthermore, findings have been shared among the Kakita River Ecosystem Research Group, concerned bodies (NPOs), and administrative bodies, by exchanging the results of investigation and research.

Key words: Watershed of Mt. Fuji, the Kakita River, electrical conductivity, dissolved oxygen amount, number of bacteria

1. はじめに

柿田川は、静岡県駿東郡清水町を南北に流れ、狩野川に合流する延長 1,200m の日本最短の一級河川であり、日本有数の湧水河川である。

富士山流域圏は、表流水とともに地下圏に広がる溶岩台地が生み出す莫大な量の地下水により構成されているが、地下水の利用や柿田川への湧出など、未だ局所的な把握にとどまっており、その動態に関する知見は乏しい。(図-1)

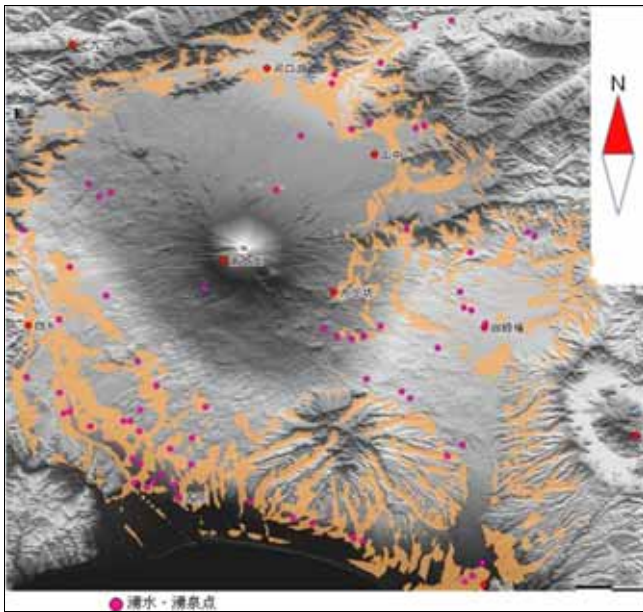


図-1 湧水が多く涵養されていると推定される区域

平成12年以降、柿田川を対象サイトとして、生態学者よりなる柿田川生態系研究会（以下、研究会と称す）が組織され、分類学的研究に加えて生態学的な視点からの研究が展開されてきた。

本研究では研究会の活動と関連して、富士山流域圏を対象として、地下水の利用と保全、地下水流動を視野に入れた水域（表流水及び地下水）環境（生態系）の保全と河川管理のあり方を考える新たな評価・分析手法を提案することを目的に、地下水の滞留時間、動態、湧出状況、微生物生態系に関する情報の収集・分析などにより、富士山流域圏の総合的な水循環研究を行うものである。

また、研究会では湧水を起源とする生態系、物理環境及び生物群集の構造に関する研究成果を共有するとともに、関係団体（NPO）・行政機関などと相互に調査・研究成果を情報交換することにより、地域共有の知見の蓄積を図る活動を実施しており、2010年度のその活動概要についてもあわせて報告する。

2. 研究目的

流域の水循環に関しては、これまで河川水、地下水など個別に検討されてきたが、水循環系としての把握は十分になされて来なかった。

富士山流域圏は、湧水河川として著名な柿田川を有しており、この全長わずか1200mの河川の流水は年間を通じて安定した湧水量(12m³/s前後)を維持しており、また水温も年間を通じて15℃前後の柿田川本川と比べて変動が小さいことで知られる(図-2)。

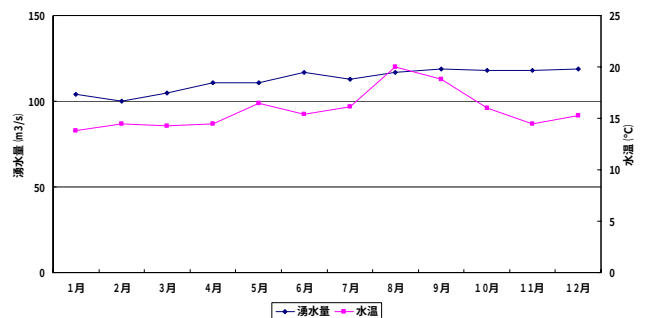


図-2 柿田川の湧水量と水温の季節変動

しかしながら、図-3より柿田川の湧水量は、近年減少傾向にあることが分かる。

柿田川湧水量の経年変化を見ると、観測開始時の1963年から1980年代中頃まで低下傾向にあり、その後現在までほぼ横ばいとなっている。

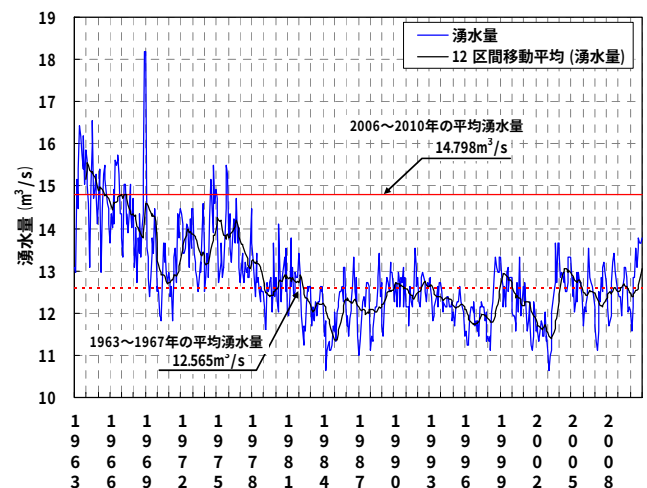


図-3 柿田川の湧水量の変遷

近年のこのような状況を踏まえ、今後の健全な河川環境や河川の利活用を考えると、河川区域以外や地下水も含めた流域の水全体を捉えた調査、分析、評価が必要であると考えられる。

3. 研究内容

3-1 駿河湾沿岸域（田子の浦沖）における湧水の特徴

既往の研究において、実施された富士山流域圏における地下水の水循環解析モデルの予測結果では、富士山の湧水は駿河湾沿岸域（田子の浦沖）においても噴出しているとの結果が得られている。

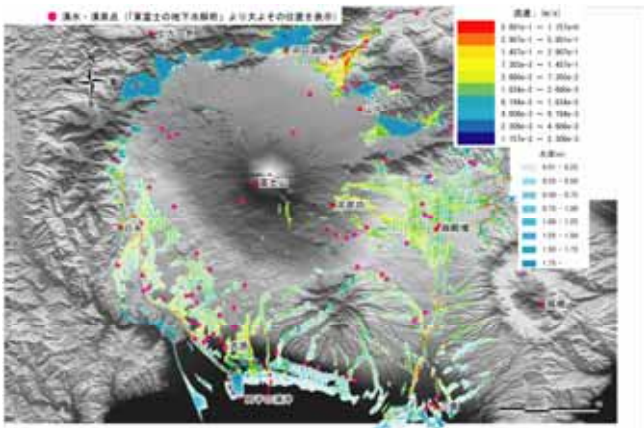


図-4 富士山流域圏における地下水の挙動解析
((株)地圏テクノロジーによる地下水挙動解析)

その解析結果に基づき駿河湾沿岸域において小型船による現地観測を実施した結果、田子の浦沖数百m地点(水深96m)で極めて塩分濃度の低い地点(St.T1-7G, St.T1-8G)を発見した。塩分はなんと最小値で14‰(海水は約35‰)を記録した(表-1)。

周辺とは明らかに水質が異なる地点を確認するなど、富士山地下圏の地下水の流動に関する新規の情報が得られている。

3-2 富士山麓東南麓と西南麓さらに北麓の湧水の特徴

そこで本研究では、水循環系としての富士山地下圏の地下水流動に関する更なる知見を得るため、富士山麓東南麓と西南麓さらに北麓(テフラ層)を比較しながら地下構造と水脈を推察する情報の取得につとめ、地下水の涵養とその過程に関する知見を集積するとともに、生物地球化学的な観点より水と微生物の相互作用から地下圏における水循環過程への微生物学的関与および水質形成に関する研究を実施するものである。

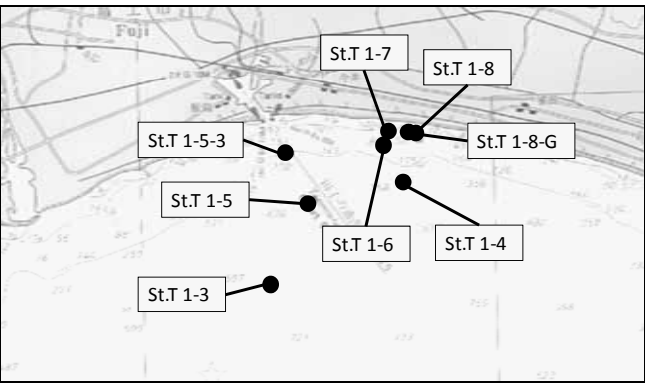


図-5 田子の浦沖での詳細観測地点
(スケールバーは1km)

表-1 田子の浦沖の観測結果

観測点	深度(m)	塩分	水温 (°C)	濁度(ntu)	電気伝導度 (S/m)	溶存酸素濃度 (mg O ₂ /L)	pH
St.T1-7	0.2	32.7	19.1	2.8	4.59	8.48	6.58
	5.1	34.4	19.2	3.1	4.80	8.44	6.57
	10.1	35.0	19.8	3.3	4.86	8.64	6.57
	20.3	35.2	20.1	2.0	4.89	8.76	6.58
	30.3	35.3	20.1	3.6	4.90	8.00	6.60
	40.4	35.3	20.1	3.5	4.90	8.38	6.61
	50.5	35.3	20.1	3.3	4.90	7.90	6.62
	56.1(海底)	35.3	20.1	3.1	4.90	7.58	6.63
St.T1-8	0.5	32.6	19.2	6.3	4.57	8.20	6.70
	5.0	34.6	19.5	4.9	4.82	8.40	6.66
	10.0	34.9	19.8	4.8	4.84	9.23	6.61
	20.3	35.2	20.1	4.6	4.88	8.86	6.56
	51.0	35.3	20.1	4.4	4.89	8.41	6.61
	71.3	35.2	20.1	4.3	4.89	8.29	6.60
	80.8	35.3	20.0	4.1	4.90	7.57	6.61
	87.2(海底)	34.1	20.0	101-235	4.67	7.38	6.60
St.T1-8G (海底のみ)	96.2	17.8	19.1	>1000	2.86	2.28	6.53
	96.2	17.7	19.8	905.8	2.47	0.00	6.53
	96.2	14.0	19.8	737.6	2.17	0.00	6.53
	95.5	16.0	n.d.	286-431	2.42	0.00	6.52

(1) 観測対象地点とその特徴

サンプリングは富士山東麓に位置する須川源流、山久荘、上小林、田向十二神社と西南麓に位置する杉田周辺(杉田不動尊内部、天満天満宮)にて行った。

サンプリング地点は図-6に示す。

1) 富士山東麓

須川源流は標高約 450m の地点に位置し、津屋(1968)の地質図では沖積扇状地堆積物とあったが、採水地点ではスコリアと火山灰が何層も層状に重なっており、粒径 1cm 程のスコリアの層が透水層、粘土化した火山灰の層が不透水層となり、その間から湧出していた。

上小林は標高約 560m の地点に位置し、津屋(1968)によると、火山灰その他噴出物(新富士火山・新期玄武岩溶岩および火山灰層)とあった。湧水は地面から湧き出しており、湧水池と小川を作っていた。山本(1992)がまとめた湧水の一覧によると、湧出量は $5184\text{m}^3/\text{d}$ である。

山久荘は標高約 390m の地点に位置している。底から湧き出しており、湧水池を作っていた。民宿の裏手に位置し、この水源からわさび田を作っている。

田向十二神社は標高約 600m の地点に位置している。神社の奥の斜面を登った場所で湧出していた。

2) 富士山西南麓

杉田不動尊は標高約 210m の地点に位置し、津屋(1968)によると大淵溶岩流とあった。この地点は周囲に茶畑が分布しており、窒素汚染されている可能性があった。

今回の地点は、不動尊内部で採水した。不動尊内部は夏よりも冬に湧出量が多いようであった。11月の時

点における不動尊内部での湧出量は $1.7\text{m}^3/\text{d}$ である。

天間天満宮は標高約 100m の地点に位置している。天間天満宮の裏手にて地面から湧出して小さな湧水池を作っていた。昔は湧出量が多かったようで、天満宮の入り口には大きな池の跡が確認できた。湧出量は $1.9\text{m}^3/\text{d}$ である。



図-6 富士山麓の地質図とサンプリング地点

地質特性別に富士山湧水を 3 グループに分けてその特性を表-2 にまとめる。

大きく見るとこれら 3 グループ間で物理化学特性に顕著な違いは認められないが、図-7 に示すように水中に溶存するイオン濃度には西南麓と東麓ではその特徴が異なる。

表-2 富士山湧水の物理化学的特性

	西南麓 溶岩流	東麓 溶岩流	テフラ層 (北麓)
調査日	2009.4.4~10.5.1	2009.4.28~11.15	2008.7.19~10.5.2
水温 (°C)	13.1~16.3	13.3~15.7	12.2~14.1
pH	5.69~7.71	6.42~8.20	7.12~8.01
EC (dS/ml)	77~257	66~169	111~134
DO (mg/L)	6.90~10.73	6.77~9.20	20.5~29.1
DOC (um)	7.4~23.0	20.5~29.1	15.7~18.0

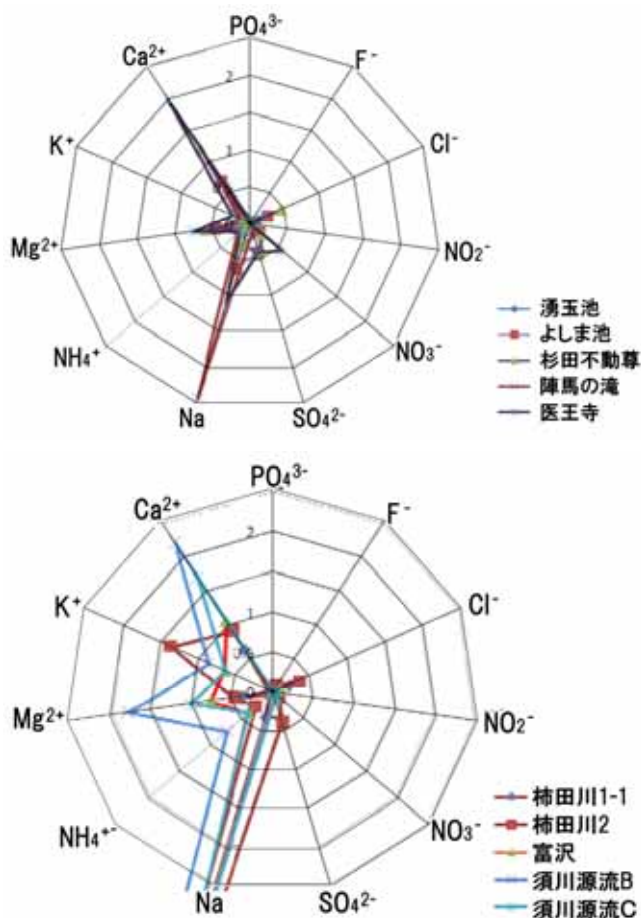


図-7 富士山地下圏の地下水中の溶存イオン濃度分

西南麓では東麓に比べて概して溶存イオン濃度が低い、特にカリウム Ca^{2+} やマグネシウム Mg^{2+} でその傾向が明らかに現れている。

4. 研究結果

ここでは既往文献や研究などの結果を踏まえながら解析結果の考察を行う。

4-1 富士山地下水の滞留時間と地下圏構造

富士山地下圏が涵養する地下水の滞留時間については、1960年代に水爆実験により大気圏に供給されたトリチウムによる測定がなされ、ほぼ10年という数値が得られている¹⁾。

半減期の短いトリチウム 3H (12.43年) の自然環境中での濃度の低下により環境水の年代測定は近年、容易ではなくなってきた。フロンや塩素を使う手法が試みられているが、既往研究では塩素の同位体を用いた富士山地下水の滞留時間が東麓では25～35年、西南麓では20年未満であることを示した²⁾ものがある。

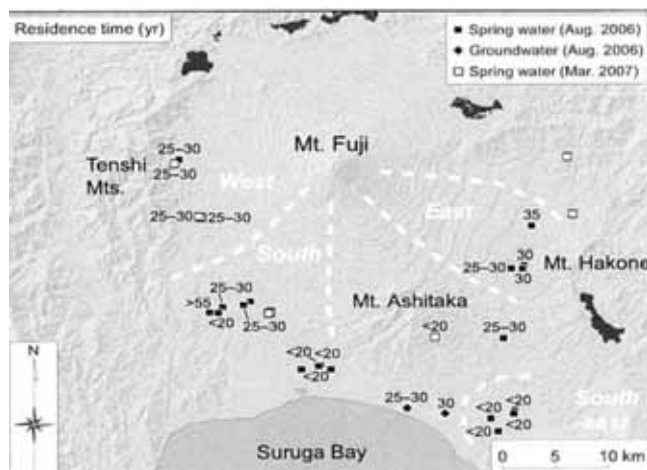


図-8 塩素同位体で推定した地下水の滞留時間 (Tosaki et al.2008より)

調査対象となった地点は地圏テクノロジーによる地下水流速の大きな地点(図-4)と重なることから、マクロにみると富士山麓の標高100から500mに分布する湧水群の地下圏における滞留時間に大差ないことが推察される。

しかしながらこの数値は、湧き出した水のもつ平均的な、それも多様な水脈から流れ出る水が混合した結果を表しているものと考えられる。

4-2 地下水中の微生物群集の解析から地下圏の特徴を推定する

図-9に富士山東麓並びに西南麓、東北側のテフラ(火山灰)層から湧き出る湧水中の細菌数を表す。

東麓三島溶岩流域に比べ西南麓では細菌数が2～3倍高いこと分かる。この数値は火山灰層から湧出する有機物成分をやや多く含んだ湧水中の細菌数に近い値³⁾であり、いずれも溶岩流が基盤と成る地質構造である東麓と西南麓の明らかな違いは、地表の土地利用であると推察される。

東麓では三島溶岩流が形成する黄瀬川に沿って地下水が多数湧出している。これに対して西南麓では耕作地、とりわけ茶畑が広がっており、多くの湧水地点はそれらの影響を受けていることが推察される。

現在までにえられた富士山湧水中における細菌数と水中の有機物濃度との関係は図-10に示すような正の相関の傾向があることが認められている。

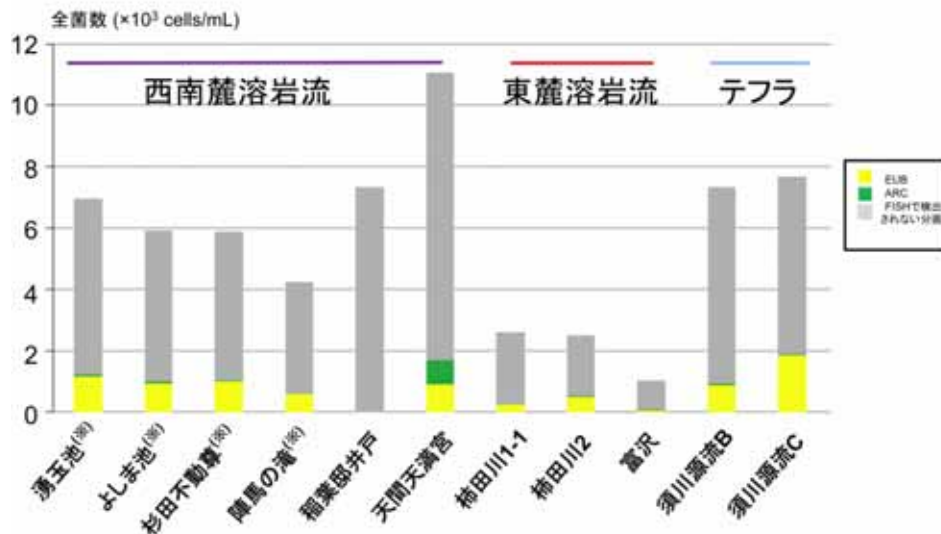


図-9 富士山湧水群に於ける細菌数と顕微鏡遺伝子解析(FISH 法)による群集構成の比較

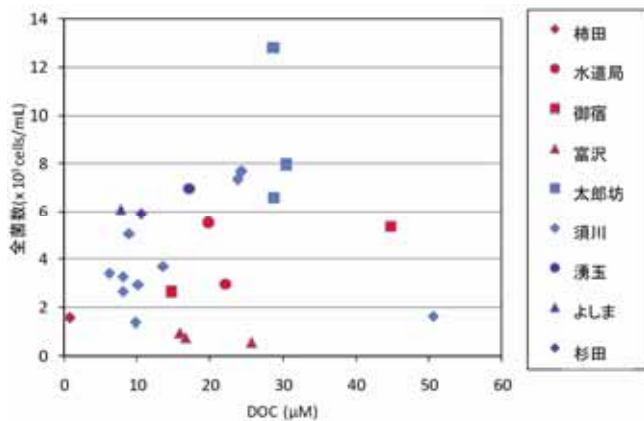


図-10 富士山湧水における全菌数とDOCの相関

また、東麓須川源流の火山灰層における細菌群集の遺伝子解析による詳細な比較検討⁴⁾から、細菌群集は地下水が湧出する直近における地層との相互作用の影響を強く受けていることが指摘されている。以上のことを考え合わせると、地下水の形成における、

- (1)長い時間をかけた岩石-水相互作用、
 - (2)短い時間における地下水と地層・地質の相互作用、
 - (3)浅い地下水への土地利用の影響、
- の3点が地下水理解における基本ポイントであるとまとめることができよう。

4-3 西南麓と東麓湧水中の細菌群集構成の遺伝子解析による比較

図4で明らかなように、(1)富士山湧水中の細菌数は海洋や湖沼、河川などと比べ1~2桁も細菌密度は小さい、(2)検出された全細菌数に占める遺伝子で検出されない細菌(の灰色部分)の割合が大きく、これは

活性の低い細菌の占める割合が大きいことを示唆している。

これらを前提に、東麓と西南麓の相標的な湧水における細菌群集の構成を詳細な遺伝子解析を行って調べたところ、以下のような結果を得た。

西南麓のよしま池と東麓柿田川湧き間1-1の細菌群集に関する classifier による遺伝子解析において、よしま池では44クローン、柿田川湧き間1-1では43クローンの塩基配列が決定された。両地点で Bacteroidetes、Cyanobacteria、Proteobacteria と近いクローンが確認された(図-11)。

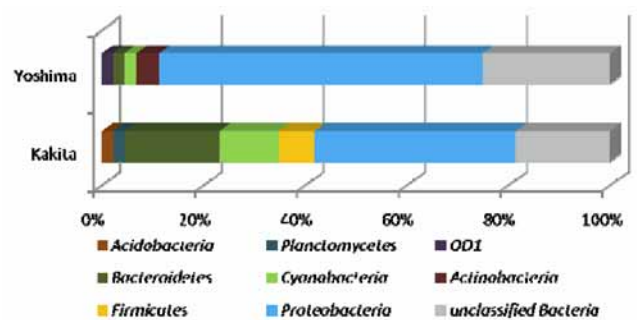


図-11 柿田川およびよしま池湧水中のバクテリアの遺伝子解析結果

4-4 富士山地下水の海洋生態系への影響

2009年11月27日、田子の浦沖数百m地点(水深96m)で極めて塩分濃度の低い地点(St.T1-8G)を発見した(表-1)。塩分は最小値で14‰(海水は約35‰)を記録した。

2010年度はこの結果を踏まえて、湧水が海水生態系

へ与える影響を推察する実験を行った。実験では、海底湧水池点に近い駿河湾田子ノ浦沖の水深 10m の海水に西南麓を代表する湧水の一つであるよしま池の濾過湧水（湧水中の細菌をのぞくため孔径 0.2μm のフィルターで濾過したもの）を等量加えて現場環境の近似した環境中で培養した。結果を図-12 に示す。

培養開始 24 時間までは現場海水（これに細菌群集が含まれている）に濾過海水を添加した系の方がやや高い増殖をももたらしたが、その後湧水添加系の方が細菌の増殖に寄与する傾向が見られた。湧水中には海水に比べて明らかに高濃度の窒素が含まれており、窒素などの栄養塩やその他の微量元素が細菌群集の増殖に効果を与えた可能性があるのではないかと考えている。細菌群集は海洋生態系をその基盤で支える生物群であることから、地下水の海底湧出は漁業への影響までも推測させるものであることが示唆された。

表流水として降水が海に供給される場合と、湧水として供給される場合の生態系へのインパクトをその量も加味して考察することが、山地に富む我が国の沿岸生態系への水循環の視点からの考察に不可欠ではないかと考えられる。

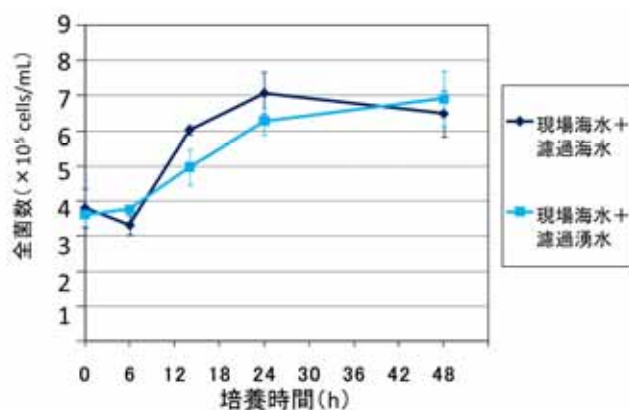


図-12 富士山湧水における全菌数と DOC の相関

5. 地域団体などとの情報交換

平成 22 年度における研究では、水循環系としての富士山地下圏の地下水流動に関する更なる知見を得るため、富士山麓東南麓と西南麓さらに北麓を比較しながら地下構造の情報より地下水の流れ、容量、滞留時間に関する研究を実施するとともに、生物地球化学的な観点より水-微生物の相互作用から地下圏における水循環過程への生物学的な関与および水質形成に関する研究を実施する。

また、研究会及び現地調査を実施するとともに、研究成果の発表・普及の場としてシンポジウムを企画、

開催する。

上記、平成 22 年度の研究会の活動を表-3 に示す。この内、住民との情報交換が多く行われたミニシンポジウム及び 10 月 24 日の現地視察会について、その概要を記す。

表-3 平成 22 年度研究会の主な活動

活動	実施時期
平成 22 年度ミニシンポジウム開催	5 月 29 日
第 16 回柿田川生態系研究会開催	5 月 29 日
第 17 回柿田川生態系研究会開催	10 月 23 日
柿田川生態系研究会・現地視察開催	10 月 24 日
第 18 回柿田川生態系研究会開催	1 月 7 日

5-1 平成 22 年度ミニシンポジウム

ミニシンポジウムは例年研究会が柿田川の近隣地域で開催する研究者や地元市民などを対象とした研究発表会である。

今回のミニシンポジウムは清水町内で開催され、研究者や市民など、約 30 名の聴講者が集まった。桜美林大学の三島名誉教授、強度大学の竹門教授、静岡大学の加藤教授による研究成果発表が行われた。



写真-1 ミニシンポジウム

5-2 柿田川生態系研究会現地視察

10 月に開催した現地視察会では、公益財団法人柿田川みどりのトラスト（以下、トラストと称す）の方の案内による富士山麓植樹地（裾野市須山浅木塚国有林）の視察を行った。

この取り組みは、平成 8 年 9 月の台風後の自然林の

復元を図り柿田川の涵養域の機能保全を図るためトラストのメンバーが植樹を行うもので、平成12年から平成22年の10年計画で約22,000本の植樹を行ったという。

現地では植樹の取り組みに関して、シカの食害が多いこと、ススキが繁茂していて日照があたりにくいことなど、植樹に関する問題点やその対処法などについて研究会、トラストのメンバーによる意見交換が行われた。

6. おわりに

今後の研究の進め方については、富士山麓の代表的な湧水、地下水についてその履歴から得られる情報を富士山地下水の年代推定の新たな知見とあわせて統合的な考察を進めたい。

また、研究会が柿田川の水環境保全に努める公益財団法人柿田川みどりのトラストをはじめとする地元と結びつきながら、柿田川を代表する富士山流域圏の湧水の保全に寄与する研究を継続させたい。

<参考文献>

- 1) 土隆一, 2007, 富士山の地下水・湧水. 富士火山 (荒牧重雄, 藤井敏嗣, 中田節也, 宮地直道 編), 375-387, 山梨県環境科学研究所
- 2) Tosaki, Y., Tase, N., Sasa, K., Takahashi, T. and Nagashima, Y., 2008, Estimation of groundwater residence time using bomb-produced ^{36}Cl : a case study on spring waters from Mt. Fuji, Japan, Integrating Groundwater Science and Human Well-being, 999-1005
- 3) Koita, M., Nagaoka, A., Ago, T., Ishibashi, I., Nagaosa, K., Nakano, T., and Kato, K., 2008, Distribution of bacteria and dynamics of groundwater in subsurface environment of Mt. Fuji. 7th International Symposium for Subsurface Microbiology (ISSM 2008). Shizuoka, Japan. Abstract, 46p.
- 4) 吾郷友基, 2007MS, 富士山東麓湧水群における地下水環境と細菌の分布. 静岡大学理学部地球科学卒業論文, 638, 38p.



写真-2 現地視察会の様子



写真-3 トラスト植樹場所