

## 茨城県つくば市における湧水の特徴

Characteristics of Spring Water in Tsukuba City, Ibaraki Prefecture

水尻 正博\*・藪崎 志穂\*\*・田瀬 則雄\*\*\*・辻村 真貴\*\*\*

Masahiro MIZUJIRI\*, Shiho YABUSAKI\*\*, Norio TASE\*\*\* and Maki TSUJIMURA\*\*\*

### 1 研究の背景

湧水とは一般的に地下水が自然状態で地表面に流出したものであり、身近な生活用水として古代から利用されている。現在では「名水」などと呼ばれ観光の名所としても親しまれている。山地周辺や扇状地の扇端部、台地の崖線部などに広く分布し、各地域の湧水を対象とした研究も盛んに行われている。例えば井野（1987）や佐藤ほか（1997）では富士山周辺の湧水について、島野（1994, 1997, 2001）では阿蘇山周辺の湧水について研究が行われている。また、日本地下水学会（1994, 1999）では、1985年に環境庁によって選定された「名水百選」を中心に全国の名水が紹介されている。

湧水は水道水に比べて“おいしい”“きれい”と認識される傾向があり、飲料などとして利用するために湧水をくみに訪れる人々が多くみられる。湧水を含む地下水の水質は地域により多様であるが、水道水に比べてカルシウムなどの無機イオンを多く含む場合が多く、これが“湧水はおいしい”とされる由来であろう。しかし、湧水・地下水が“きれい”であるかということ、必ずしもそう

ではない。環境省環境管理局水環境課（2005）によると、水質汚濁に係る環境基準のうち、人の健康の保護に関する環境基準（健康項目）については、現在、カドミウム・鉛等の重金属類、トリクロロエチレン等の有機塩素系化合物、シマジン等の農薬など、26項目が設定されているほか、さらに要監視項目としてクロロホルムなどの27項目が設定されている。全国的な地下水水質状況の把握を目的として平成16年度（2004年度）に実施された概況調査の結果によると、調査対象井戸（4,955本）の7.8%（387本）において各項目の環境基準を超過する井戸がみられた（環境省環境管理局水環境課、2005）。また、1999年2月に要監視項目から環境基準となった硝酸性窒素及び亜硝酸性窒素の環境基準超過率は5.5%と、他の項目と比較して最も高くなっている。硝酸性窒素及び亜硝酸性窒素が一定以上含まれている水を摂取すると、乳幼児を中心に血液の酸素運搬能力が失われ酸欠になる症状（メトヘモグロビン血症）を引き起こす。硝酸性窒素及び亜硝酸性窒素による地下水の汚染については、田瀬（2003）などが指摘しているように全国的なスケールで発生している。汚染原因は畑地での過剰施肥や家畜排泄物な

\* 筑波大学第一学群自然学類

\*\* 筑波大学陸域環境研究センター

\*\*\* 筑波大学生命環境科学研究科

どの農業起源、し尿や家庭排水などの生活排水起源を中心として、工業起源や大気起源など多様である。地下水の一部である湧水についても同様のことがいえるであろう。

また、都市化に伴う水環境の変化に起因する湧水の湧出量の減少や、湧水そのものが枯渇・消失したケースも存在する。例えば、東京都環境局は東京都内の湧水についての調査を平成2年から毎年行っている。平成12年では717ヶ所において湧水が確認されたが、これは5年前の平成7年度の調査と比較して70ヶ所の湧水が消失していたことになる（東京地下水研究会、2003）。この原因として、建物の建設や土地の造成などによる湧水地点そのものの消失や、都市化に伴い地表が建物やアスファルトなどで被覆され、雨水浸透が減少したことが挙げられる。

以上のような湧水の水質汚染、湧出量の減少や消失および枯渇などを背景に、東京都など一部の自治体では湧水・地下水の保護・保全への取り組みが進められている。

茨城県つくば市には、筑波山山麓を中心に多くの湧水が広域にわたって分布している。つくば市によりこれまで多数の湧水が確認されており、市民参加型の調査活動も活発に行われるなど、市民の関心も高い。さらに、つくば市は湧水の分布や利用方法、歴史、周囲の自然環境などに関して聞き取り調査を行っている（つくば市、2004）。この調査の中で、複数の湧水地点で湧出量の減少および湧水地点の消失が明らかにされている。また、都市化に伴う水文環境の変化も吉谷ほか（2001）により指摘されている。このようなことから、つくば市においても湧水の保護・保全に向けた取り組みが必要であると考えられる。しかしながら、つくば市においてはこれまでに湧出機構や水質特性などの水文学的な立場に立った調査はあまり実施されていない。湧水の保護・保全への取り組みを進めるためには、湧水の調査を行い、その実態を明らかにすることが必要である。そこで、

本研究では、茨城県つくば市周辺の湧水を対象として、湧水の分布状況や湧出機構、および水質特性などを明らかにすることを目的として調査・解析を行った。

## II 研究対象地域の概要と研究方法

### 1. つくば市の地形・地質

つくば市は茨城県の南西に位置し、多くの研究教育機関が集まる筑波研究学園都市を構成している（Fig. 1）。南北に30.4 km、東西に14.9 kmと南北に長い形状をしており、面積は約287km<sup>2</sup>と県内では3番目に広い面積を有している（つくば市市長公室行政経営課編、2005）。市北部には筑波山が位置するほか、市の大部分は筑波台地で構成されている。

筑波山はつくば市北部に位置し、女体山（標高877 m）と男体山（標高871 m）の双峰をなす。4つの山塊（八溝、鷺子、鶏足、筑波）からなる八溝山地が茨城県を南北に伸びているが、筑波山は南端の筑波山塊に属する。山頂部はんれい岩で構成され急斜面をなす。山麓部は花崗岩や変成岩を基盤岩とし、花崗岩が風化してできたマサ土が地表を覆い緩斜面が発達している（池田、2001）。

一方、つくば市の大部分を構成する筑波台地は、桜川および小貝川に挟まれた標高10～30 m程度の洪積台地であり、花室川、小野川、（東）谷田川、西谷田川などの河川によって開析され崖線を形成している。浅層部の地質層序は上位から、関東ローム層、常総層、木下層からなる。筑波台地における地下水面は通常地表面下10 m以内の関東ローム層や常総粘土層中に位置している（宇野沢ほか、1988）。

### 2. 土地利用と上下水道

筑波山はブナやアカガシなどの森林で覆われており、つくば市の林地面積の多くはこの地域に存

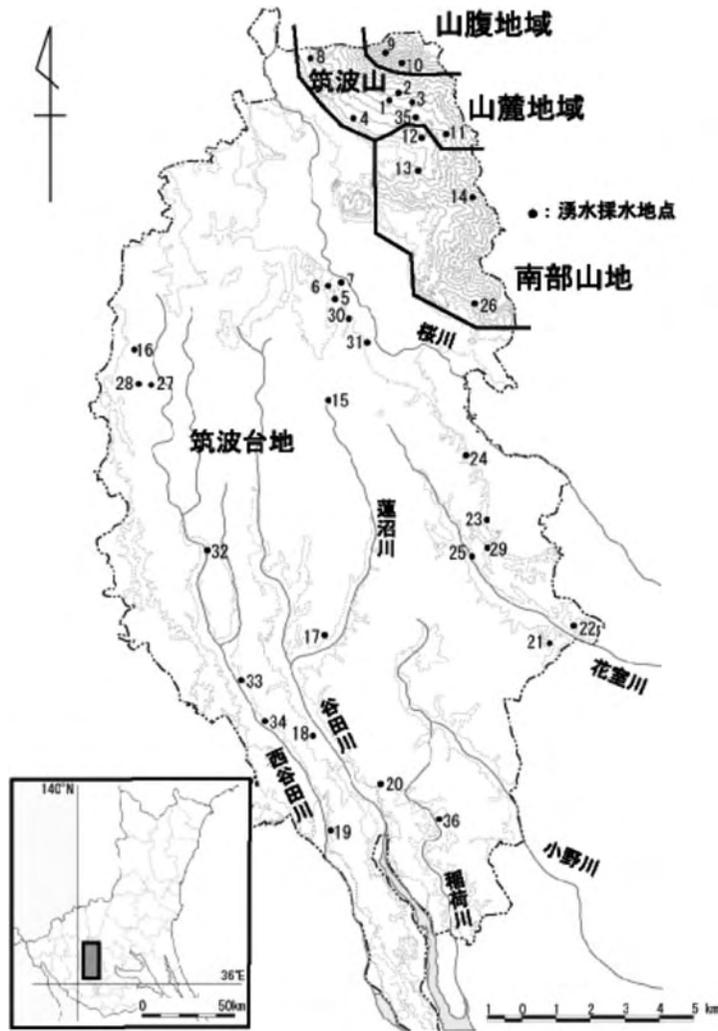


Fig. 1 研究対象地域の概要

在している。桜川低地には水田が広がり、筑波台地は大部分が畑地と宅地で構成されている。全体として約 1/4 を占めている畑地では、シバ（出荷量日本一を誇る）やハクサイ、ネギなどの野菜が栽培されている。桜川低地を中心に各河川沿いに水田が発達し、また畜産なども行われている。しかし近年では筑波研究学園都市を中心として都市化が進んでおり、宅地は増加傾向にある（つくば市市長公室行政経営課編，2005）。また、2005 年 8 月にはつくば市と東京の秋葉原とをつなぐつく

ばエクスプレスが開通し、つくば市の都市化はさらに加速していくと予想される。

また、つくば市では上下水道の整備が進められている。つくば市市長公室行政経営課編（2005）によると、上水道（簡易水道・専用水道を含む）の普及率は平成 15 年度末で 68%（簡易水道等を含めると 81%）、下水道普及率は平成 16 年度に 74.6% に達している。つくば市の上水は霞ヶ浦浄水場から供給されており、霞ヶ浦や地下水が起源となっているが、地下水の割合は 5～10% 程度

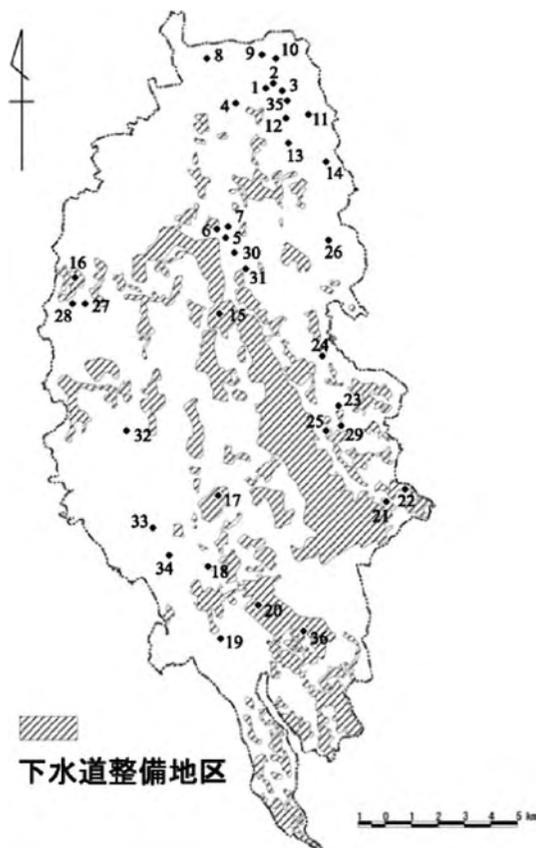


Fig. 2 対象地域における上下水道の普及率

であり、ほとんどは霞ヶ浦から取水された水である。茨城県土浦市大岩田地区に設置された浄水場で浄化され、つくば市内に配水されている。下水道の整備状況を Fig. 2 に示す。水と汚水の排水はそれぞれ別系統で処理する分流式となっており、雨水は分散放流される。汚水は筑波研究学園都市公共下水道及び霞ヶ浦常南流域下水道に集めて利根町の終末処理場で高度処理され、利根川に放流されている（つくば市市長公室行政経営課編，2005）。

### 3. 湧水の分布とその状況

現地調査は、対象地域内の湧水 36 地点について行った。多くは湧出地点にて調査を行ったが、中には湧出地点までたどり着けず下流にて調査・

採水した地点もある。

## 4. 調査方法

### 1) 現地調査の概要

2005 年 7 月 24, 30, 31 日（一回目の調査）および、2005 年 11 月 10～25 日（二回目の調査）において、湧水地点の現地調査を実施した。各調査地点を Fig. 1 に示した。現地調査をはじめ、つくば市市民環境部環境課（2004）やつくば市環境保全部環境課より提供していただいた調査資料を基に各調査地点の概況について Table 1 にまとめた。調査・採水が可能であった湧水地点は 36 カ所であった。湧水地点の中には実際に湧出している地点までたどり着けず、湧水と考えられる表流水を採取した地点もある。現地では採水・観察のほか、ポータブルメーターを用いた水質測定および湧出量測定を実施した。

一回目の調査は、つくば市市民環境部環境課（2004）およびつくば市環境保全部環境課の湧水調査資料に基づいて行った。上記の資料では井戸水や深層地下水を人工的に流出させたものも湧水としているが、本研究ではそれらは湧水として扱わなかった。資料で紹介されていた湧水のうち、調査・採水が可能であった地点は No. 1-24 の計 24 カ所であった。

二回目の調査では、筑波台地の崖線部を中心に探索し、発見できた湧水について調査を行った。これには 7 月の調査で発見できなかった湧水も含まれている。調査・採水が可能であった地点は No. 25-36 の計 12 カ所であった。

### 2) 降水量

対象地域内にある筑波大学陸域環境研究センターで観測されている調査期間内の日降水量を Fig. 3 に示した。7 月の調査日前後にあたる 7 月 25～26 日にかけて、台風が北上した影響によるまとまった降雨があった。11 月の下旬は高気圧に覆われ、晴れの日が続いた。

Table 1 採水地点とその概要

No.	地点名または湧水名	概要
1	清水	筑波山麓に位置し、筑波山神社を中心とする集落内にある。
2	御神水	筑波山神社の境内にあり、参拝者の清め水として利用できるよう整備されている。
3	つくばふれあいの里近く	筑波ふれあいの里から下って雑木林に入ったところにある。ふれあいの里の職員により整備され、湧出量が多いことから湧水を汲みに来る人も多い。
4	稲葉酒造	筑波山神社から南西に下った稲葉酒造の敷地内にある。上流 250 m 付近の湧出地点から導水している。
5	佐①	佐地区にある湧水のひとつ。筑波台地末端斜面の中腹に位置し、使われなくなった水田の脇にある枯れ木の根元から染み出た水をパイプによって集水され湧出している。(現在は使用されていない)
6	佐②	同じく佐にある湧水で、台地末端斜面を下る水田の畦で湧出。水田は段丘状につくられ、地形変換点から湧出している。
7	佐③	佐②の少し下流に位置していた。概況は佐②とほぼ同じである。
8	一乗院	筑波山麓の西に位置する上大島の集落にある一乗院から東側の山の斜面を 100 m ほど登ったところにある湧水。
9	御海	男体山山頂から 100 m 程下った地点にある湧水。大きな岩の陰から湧出していた。
10	男女川源流近く	実際に水源を確認することができなかったため、湧出した水が作ったと考えられる渓流水を採取した。
11	十五の泉	筑波山の南東部に作られたつくばねゴルフクラブ内、15 番ホールの脇にある。飲料用に整備され、くりぬかれた岩の穴から流出していた。
12	ヒヤミズ	筑波山麓の南東にある六所神社の西側に位置する。湧水付近の住民が飲料水・生活水として使用している。
13	蚕影山	ヒヤミズから南にある蚕影山神社の山道入り口にある流出口から採水した。
14	不動峠	筑波山南部山地の中腹に位置し、北条から不動峠に至る山道の脇から湧出している。
15	蓮沼	筑波台地上の蓮沼集落にある民家の敷地内にある。蓮沼川の源流部でもあり、以前は蓮沼川の水源として多量の湧出量があったが、現在の湧出量は僅かである。

No.	地点名または湧水名	概要
16	吉沼	台地上の吉沼集落にある民家脇のコンクリート排水溝のつなぎ目からわずかに湧き出している。かつては周辺の水田を涵養できるほどの水量があったという。
17	柳橋	蓮沼川下流、柳橋地区にある民家の裏手に存在している。高さ 3~4 m 程度の露頭があり、その側壁から染み出るように湧出している。
18	おうまや池	谷田部川の西側にある谷田部地区の中心にある民家の敷地内に存在している。
19	谷田部	谷田部地区の南、谷田川の左岸に位置する。
20	羽成	谷田川の左岸側、羽成地区に位置する。
21	下広岡	常磐自動車道の桜土浦 IC の近くに位置する。雑木林に囲まれた水田傍の高さ 2 m ほどの崖の下から湧出している。
22	栄泉寺	下広岡にある栄泉寺の近く、花室川の左岸沿いに位置する。
23	桜庁舎近く	桜庁舎のある高台の下、東側約 100 m にある水田地帯の水田と畑が隣接する部分から湧出している。
24	上境	上境地区の台地末端斜面に位置する。
25	九重小学校・西	花室地区にある九重小学校を西に下り、台地斜面と水田のあいだに位置する。
26	小田	筑波山南部山地の南端に位置する。
27	前原・東	前原地区に広がる畑地の脇に湧出している。染み出るように湧出し、小さな川を作って流出している。
28	前原・西	前原地区の畑地にはさまれた排水溝のつなぎ目からかすかに湧出している。
29	花室	花室地区の桜川低地に面した台地末端斜面に位置する。
30	若森	若森地区の台地末端斜面、雑木林の中に位置する。地表面から染み出るように流出し、小さな川を形成している。
31	太田橋近く	若森地区の太田橋近くにある水田の脇に位置している。
32	高山小学校・北	下河原崎地区の西谷田川左岸に位置する。
33	みずほ団地・北	鳥名地区の南に位置し、すぐ西側には西谷田川左岸が流れている。
34	みずほ団地・南	谷田部地区の北部にあるみずほ団地の南に位置する。
35	弘法水	筑波山南東の中腹にあり、ふれあいの里近くの湧水のやや南側に位置する。
36	畜産試験場・南	菅間地区の稲荷川左岸に位置する。

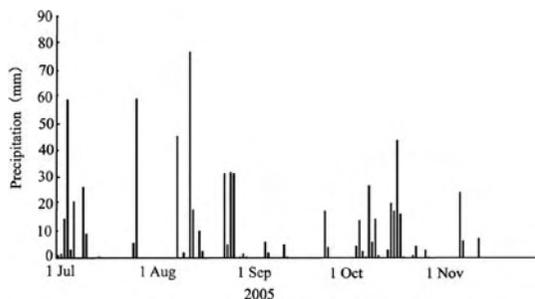


Fig. 3 筑波大学陸域環境研究センターにおける日降水量 (2005年7月～11月)

### 3) 簡易水質測定および採水方法

現地にて湧水地点とその周辺の地形を観察し、簡単なスケッチを行った。湧水サンプルは100 mlのポリエチレン製のビンを用いて採水・保存した。実験室に持ち帰ったサンプルは常温の暗所にて保存した。

現地では水温、電気伝導度 (EC)、pHを測定した。使用した測器は、ポータブル電気伝導度・pH計 (WM-22EP, DKK-TOA) である。水温については電気伝導度計の値を採用した。

### 4) 湧出量測定

湧出量は測定可能なものについてはバケツやビニール袋などを用いて一定時間 (3秒～10秒間) 採水し、プラスチック製のメスシリンダーにて計測した後、毎秒当たりの湧出量 (ml/s) として算出した。計測が不可能な場合については目視にて見積もった。

### 5) 水質分析

採取したすべての湧水サンプルについて、水質分析を実施した。分析項目は主要溶存成分である陽イオン ( $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ) および陰イオン ( $\text{Cl}^-$ ,  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{HCO}_3^-$ ) である。イオンクロマト測定およびICP測定については、あらかじめ試料水を孔径  $0.20 \mu\text{m}$  のシリンジフィルター (DISMIC-25cs, ADVANTEC) で濾過したものを用いた。

$\text{HCO}_3^-$  は採水を行った後、pH4.8アルカリ度

滴定法により速やかに分析を行った。MR-BCG混合試薬を指示薬とし、ビュレットシステム (TITRONIC basic, SCHOTT) を使用して1/50 N硫酸による中和滴定を行った。

$\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Ca}^{2+}$  の分析は、筑波大学研究基盤総合センター分析部門のプラズマ発光分光分析装置 (ICAP-757v, Nippon Jarrell-Ash) を用いて行った。測定値は4点検量法により算出し、3回の測定の平均値を使用した。ただし、7月24日に採取した試料水の  $\text{K}^+$  および7月30-31日に採取した試料水の  $\text{Na}^+$  と  $\text{K}^+$  については、後述するイオンクロマトグラフィーによるデータを用いた。

$\text{Cl}^-$ ,  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$  については、筑波大学生命環境科学研究科のイオンクロマトグラフィー (HIC-SP/VP Super, Shimadzu) を用いて行った。先述したように  $\text{Na}^+$  や  $\text{K}^+$  の一部の分析項目についてもイオンクロマトグラフィーによる分析結果を採用した。また、11月に採取した試料については、ウルトラユニットフィルター (USY-1, ADVANTEC) を用いて有機物を除去し、筑波大学研究基盤総合センター分析部門のイオンクロマトアナライザー (IC-7000, YOKOGAWA) を用いて  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$  の分析を行った。測定値は4点検量法により算出した。

## III 結果・考察

### 1. 湧出量と湧出機構

各地点における湧水のオーダー別湧出量を Fig. 4 に示した。つくば市の湧水は湧出量が1000 ml/sを超えるものが少なく、過半数は50 ml/sに満たない湧水であることから全体として湧出量は少量であるといえる。湧出量が特に多いのは御神水 (No. 2) や、ふれあいの里近くの湧水 (No. 3)、小田 (No. 26) である。それぞれ1000 ml/s以上の湧出があり、いずれも筑波山山麓に位置する湧水である。しかし、同じ筑波山山麓でも不動峠

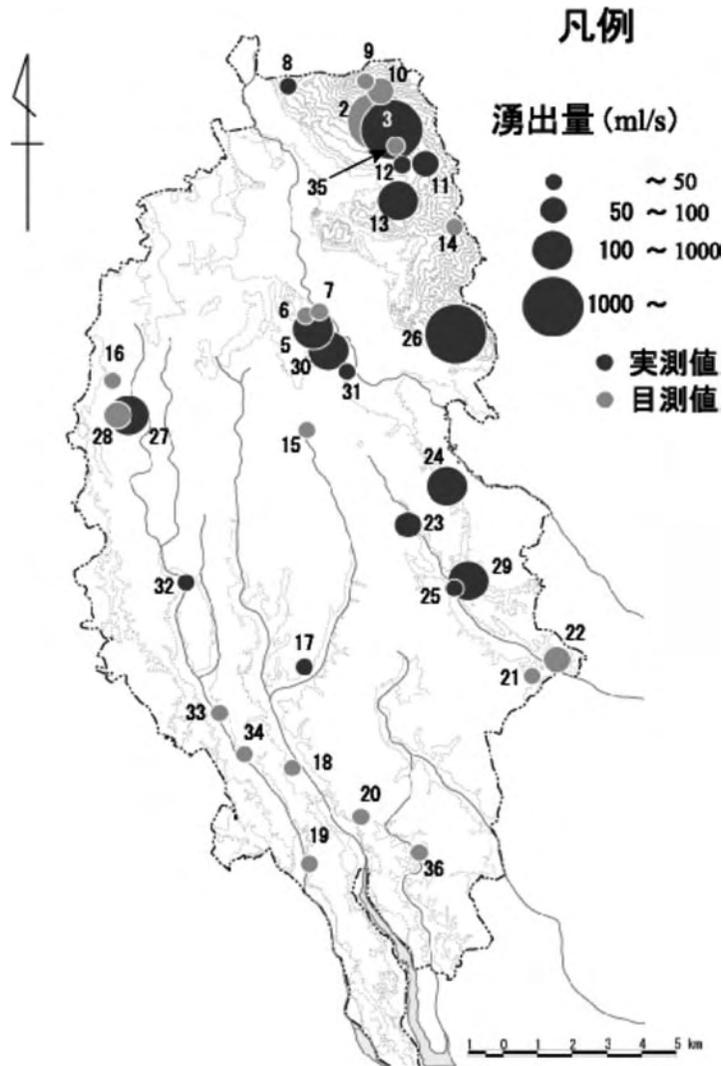


Fig. 4 各地点の湧出量

(No. 14) や弘法水 (No. 35) などでは湧出量は 50 ml/s に満たない。また、筑波山山腹に位置する御海 (No. 9) や男女川源流近く (No. 10) は 100 ml/s 以下と少量であった。筑波台地に分布する湧水では上流部に位置する佐① (No. 5) や上境 (No. 24), 前原・東 (No. 27) が相対的に多量であるが、それでも 300 ml/s 以下の湧出量であり、下流部では 50 ml/s に満たない湧水がほとんどである。こうしたことから、筑波台地周辺に位置する湧水の

湧出量は相対的に少ないといえる。

現地調査での地形観察や、1981年3月茨城県農地部農地計画課発行の5万の分1表層地質図、宇野沢ほか(1988)などを参考に、各湧水が該当すると考えられる湧出機構の模式図を作成した(Fig. 5)。本研究対象地域では以下の5タイプが想定された。

1) 裂罅<sup>れっか</sup>型

基盤岩類中の割れ目や亀裂を流れる地下水が地

表面に流出するものである。本地域では筑波山山腹に位置する御海（No. 9）がこのタイプと一致し、また男女川源流近く（No. 10）もこのタイプに属すると考えられる。これらの地域の基盤岩ははんれい岩に相当しており、湧出量は少ない。

2) 斜面型 (a, b)

山麓部の崖錐緩斜面に堆積した未固結堆積物を帯水層とし、地形変換点などの地表面と地下水面が交わる所から湧出するものである。湧出形態は同じであるが、地質の違いから更に2つのタイプに分けられる。aは筑波山山麓に分布する湧出機

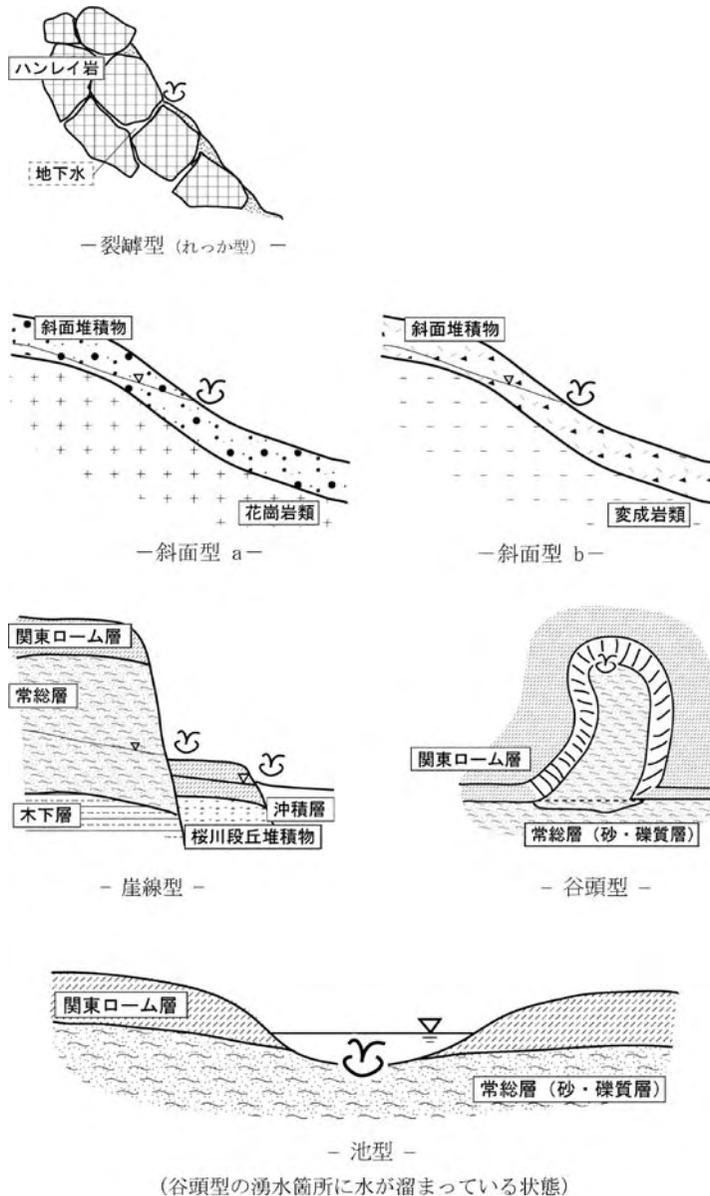


Fig. 5 湧出機構模式図

構タイプである。花崗岩類が基盤となっており、その上には、はんれい岩や花崗岩の風化土が主体である緩斜面堆積物が堆積している(磯部, 1990)。bは筑波山から南へ延びる山地(以下、筑波山南部山地と呼ぶ)のタイプとした。片麻岩やホルンフェルスなどの変成岩を基盤岩とし、地表は変成岩や花崗岩の風化土で覆われている。いずれのタイプにおいても、湧出量の多い湧水が多数存在する。

### 3) 崖線型

台地辺縁部の崖下や斜面で地表面と帯水層が交わる地点から湧出するタイプである。本研究対象地域では関東ローム層や常総層の上部を帯水層とする不圧地下水が湧出しており、後述する4)、5)タイプについても同様のことが言える。西谷田川などの河川沿いを中心に筑波台地の崖線部に多数分布しているが、湧出量は少ない。

### 4) 谷頭型

湧水の流出により周囲の土壌が削り取られ形成された湧出形態である。帯水層は3)と同様である。研究対象地域内では少数しか見られず、蓮沼(No. 15)や吉沼(No. 16)がこのタイプに属しており、湧出量は少量である。

### 5) 池型

池やくぼ地の底部より湧出しているタイプである。その形態の特徴から発見することが容易ではないため、おうまや池(No. 18)や桜庁舎近く(No. 23)のように少数しか見られなかった。湧出量は目視によっても計測は難しく、今回は欠測とした。

## 2. 湧水の水質特性

### 1) 研究対象地域の全体的な水質特性

湧水の水質分析結果をもとに、各地点のヘキサダイアグラムをFig. 6に示した。

筑波山山麓にはCa-HCO<sub>3</sub>型の湧水(No. 1, 2, 4, 8, 11)と、Ca-HCO<sub>3</sub>型およびCa-SO<sub>4</sub>型の間型の水質組成を示す湧水(No. 3, 35)が分布する。

溶存分量的には若干異なるが、互いに似通った水質を示している。全般的に溶存分量が少ないが、稲葉酒造の湧水(No. 4)は分量がやや多く、HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>の割合が高い。山頂部では溶存分量はかなり少なく、御海(No. 9)はCa-Cl型、男女川源流近く(No. 10)はCa-HCO<sub>3</sub>型とCa-Cl型との中間型の水質組成を示す。筑波山南部山地の湧水(No. 12・13・14・26)の組成はNa-HCO<sub>3</sub>型とNa-Cl型の中間型であり、溶存分量は相対的に低い。

筑波台地周辺の湧水は溶存分量が相対的に多いが、水質組成にはそれぞれの地点で特徴がみられる。筑波台地北部の佐・若森では、佐①(No. 5)、②(No. 6)、太田橋近く(No. 31)はCa-(SO<sub>4</sub>+NO<sub>3</sub>)型、佐③(No. 7)はCa-(HCO<sub>3</sub>+NO<sub>3</sub>)型、若森(No. 30)はCa-HCO<sub>3</sub>型を示す。筑波台地上の蓮沼(No. 15)ではCa-(SO<sub>4</sub>+NO<sub>3</sub>)型の組成を呈する。筑波台地北西部の吉沼・前原の湧水である吉沼(No. 16)、前原・東(No. 27)および前原・西(No. 28)もCa-(SO<sub>4</sub>+NO<sub>3</sub>)型を示している。また、前原・西はMg<sup>2+</sup>やCl<sup>-</sup>の割合が特に高い。筑波台地東部では、下広岡(No. 21)の組成はCl<sup>-</sup>・HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>・SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>の3成分が均衡している。また、栄泉寺(No. 22)、桜庁舎近く(No. 23)、九重小学校・西(No. 25)ではCa-(HCO<sub>3</sub>+NO<sub>3</sub>)型を示しているが、SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>の割合も高い。上境(No. 24)もCa-(HCO<sub>3</sub>+NO<sub>3</sub>)型の水質を示すがNa<sup>+</sup>やCl<sup>-</sup>の割合も大きいという特徴を持つ。花室(No. 29)はCa-(SO<sub>4</sub>+NO<sub>3</sub>)型の組成を呈するが、Mg<sup>2+</sup>の割合がかなり高い。筑波山南東部から南部にかけては、柳橋(No. 17)、谷田部(No. 19)がCa-HCO<sub>3</sub>型、畜産試験場・南(No. 36)がCa-(HCO<sub>3</sub>+NO<sub>3</sub>)型の組成を示すがMg<sup>2+</sup>の割合も高い。おうまや池(No. 18)の組成はCa-(SO<sub>4</sub>+NO<sub>3</sub>)型に近いが、Na<sup>+</sup>の割合も高い。羽成(No. 20)ではCa-Cl型とCa-SO<sub>4</sub>型の中間型に近いが、Mg<sup>2+</sup>の割合が高い。高山小学校・北(No. 32)はCa-SO<sub>4</sub>型の組

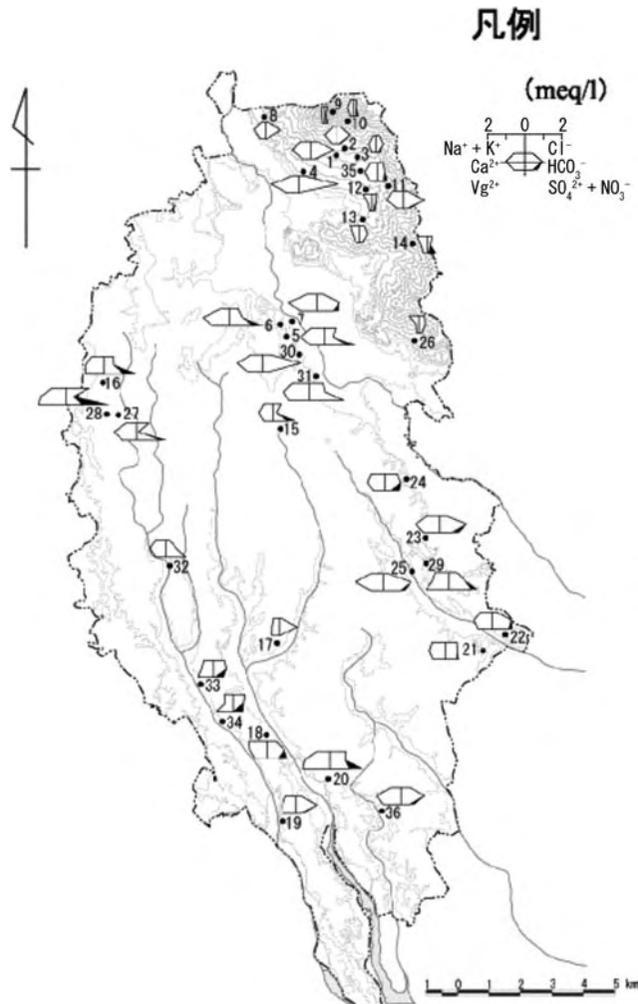


Fig. 6 ヘキサダイアグラムによる水質分布図

Table 2 筑波山の地質と水質特性区分

地点名または湧水名	グループ	水質タイプ	地質	湧出機構
9. 御海	山腹地域	Ca-Cl	はんれい岩	れっか 裂隙型
10. 男女川源流近く		Ca-(HCO <sub>3</sub> +Cl)		
1. 清水	山麓地域	Ca-HCO <sub>3</sub>	花崗岩 + 斜面堆積物	斜面型①
2. 御神水		Ca-HCO <sub>3</sub>		
3. つくばふれあいの里近く		Ca-(HCO <sub>3</sub> +SO <sub>4</sub> )		
4. 稲葉酒造		Ca-HCO <sub>3</sub>		
8. 一乗院		Ca-HCO <sub>3</sub>		
11. 十五の泉		Ca-HCO <sub>3</sub>		
35. 弘法水	Ca-(HCO <sub>3</sub> +SO <sub>4</sub> )			
12. ヒヤミズ	南部山地	Na-(HCO <sub>3</sub> +Cl)	変成岩類 + 花崗岩	斜面型②
13. 蚕影山		Na-(HCO <sub>3</sub> +Cl)		
14. 不動峠		Na-(HCO <sub>3</sub> +Cl)		
26. 小田		Na-(HCO <sub>3</sub> +Cl)		
		Na-(HCO <sub>3</sub> +Cl)		

成を呈する。みずほ団地・北および南 (No. 33, 34) では Ca-HCO<sub>3</sub> 型と Ca-Cl 型の中間型を示すが、Mg<sup>2+</sup> の割合もかなり高い。

## 2) 筑波山の水質特性

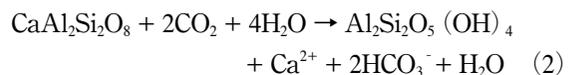
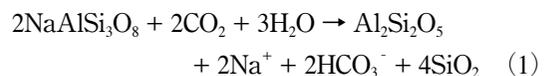
筑波山に分布する湧水について、地域や湧出機構から大きく3つのグループに分類することができる (Fig. 1 および Table 2)。ここではこのグループをそれぞれ山腹地域 (No. 9, 10)、山麓地域 (No. 1~4, 8, 11, 35)、南部山地 (No. 12~14, 26) とよぶこととする。ヘキサダイアグラムをみると、グループごとに水質特性があらわれている。

一般的に地下水は降水が地表に浸透したものであり、地層中からの成分溶出などにより水質が形成される。その成分量は滞留時間が長くなるほど多い。筑波山山腹地域の湧水 (No. 9, 10) の溶存成分量は非常に少なく、電気伝導度も低い値を示している。この地域の湧水は降水が浸透してから比較的短時間で湧出したもの、つまり雨水に近い湧水であるといえる。

山麓地域の湧水は Ca-HCO<sub>3</sub> 型、南部山地では Na-(HCO<sub>3</sub>+Cl) 型の水質タイプを示し、双方には大きな違いが認められる。筑波山周辺の土地利用は森林が大部分を占めており地表からの汚染は少ないと考えられるため、水質の違いは地質的要因によるものと推測し、以下の考察を行った。筑波山周辺の地質分布をみると (磯部, 1990)、山麓地域の地質は、基盤岩である筑波花崗岩の上にマサ土やはんれい岩角礫などで構成された緩斜面堆積物である。一方、南部山地ではホルンフェルスや片麻岩などの筑波変成岩類を基盤岩とし、貫入した花崗岩類の小岩体が多く分布している。地表面には花崗岩類や変成岩類の風化土が堆積していると考えられる。

嶋田 (1985) は南部山地の沢水およびトンネル湧水の水質形成についての研究を行っており、沢水は相対的に溶存イオン濃度が小さく、また Na<sup>+</sup>+K<sup>+</sup> および HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> が多く含まれていることが示されているが、こうした特徴は本研究で調査を

行った南部山地の湧水の水質とほぼ同様であることがわかる。嶋田 (1985) によると、南部山地を構成する片麻岩、花崗岩等の結晶質岩類は多くの斜長石を含み、これが地下水に溶解することにより陽イオンを形成する。斜長石 (plagioclase) は、ナトリウム分の多い曹長石 (albite) からカルシウム分の多い灰長石 (anorthite) にわたって広く存在し、大気から供給された CO<sub>2</sub> が地下水中に多く存在する地表付近の風化帯では、以下の (1) 式、あるいは (2) 式で示されるような反応を生じる。



こうした反応により斜長石が地下水に溶解し、Na<sup>+</sup> や Ca<sup>2+</sup> などの陽イオンを生成していることが多い。また、片麻岩や花崗岩の結晶質岩には Cl が含まれているとされている (関ほか, 1999)。従って、今回調査した湧水の水質に関しても、斜長石が地下水中に湧出し、南部山地では主に (1) 式の反応により Na-(HCO<sub>3</sub>+Cl) 型の水質を示していると考えられる。

鶴巻 (1989) によると、花崗岩質の岩石中においても、溶出する成分のうち Ca<sup>2+</sup> と Na<sup>+</sup> は斜長石に由来するとされている。ゆえに山麓地域についても斜長石の溶出が水質の形成に大きく寄与しており、(2) 式で示される反応により Ca<sup>2+</sup> が多く供給され、Ca-HCO<sub>3</sub> 型の水質が形成されたと推測される。また、はんれい岩では主に Ca<sup>2+</sup>、Mg<sup>2+</sup>、HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> が溶出することから (鶴巻, 1989)、緩斜面堆積物を構成するはんれい岩の角礫も水質形成に寄与しているものと考えられる。

## 3) 筑波台地の水質特性と土地利用

筑波台地に分布する湧水の水質組成をみると

(Fig. 6), この地域では筑波山に比べて高い値の硝酸イオン濃度が検出されている。永井 (1991) は,  $\text{NO}_3^-$  による汚染のほかに地表面の人間活動に起因する  $\text{SO}_4^{2-}$  や  $\text{Ca}^{2+}$  などの無機イオンが地下水へと負荷され, これに伴って  $\text{Cl}^- + \text{SO}_4^{2-} + \text{NO}_3^-$  や  $\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}$  が富み, 無機汚染の方向へ進化することを指摘している。つくば台地の湧水においても  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$  等が相対的に多く含まれており, 人為的影響により無機汚染が生じていると考えられる。

しかしながら, 水質汚染の進行状況は各湧水によって異なっている。水質汚染は地表面での人間活動と密接に関わっているため, 土地利用が大きく関与している。そこで湧水の水質タイプと湧水周辺の土地利用について Table 3 にまとめ, これに基づいて各湧水の汚染原因について考察した。

No. 7, 18, 22, 23, 24, 25, 36 は  $\text{Ca} - (\text{HCO}_3 + \text{NO}_3)$  型に属する。カルシウムイオンや重炭酸イオンが

多く, 一般的な土壌や岩石由来の成分が基本型となっている。しかし溶存成分量が多く, 硝酸イオン濃度も高い値を示した。マグネシウムイオンも多く, No. 7, 22, 23, 24 では硫酸イオンも高い値を示している。No. 7 および No. 24 の周囲の土地利用は宅地と畑地の混在である。また, 下水道の整備が完了している地域がほとんどであることから (Fig. 2), これらの湧水の汚染は主に畑地における施肥の影響によるものと考えられる。

No. 5, 6, 15, 16, 20, 27, 28, 29, 31, 32 は  $\text{Ca} - (\text{SO}_4 + \text{NO}_3)$  型に属する。 $\text{Ca} - (\text{HCO}_3 + \text{NO}_3)$  型と同じく, 硝酸イオン濃度が高いほか硫酸イオンも高濃度を示している。またこのタイプの特徴として, 重炭酸イオンが比較的少ないことが挙げられる。田瀬 (2004) によれば, 重炭酸イオンが少ないタイプは大量に使用されたアンモニア系あるいは有機系の窒素肥料や堆肥・家畜排泄物の硝化が原因である可能性を指摘している。湧水地点の周辺の土地利用としては, 宅地や畑地が混在している場合が多いが, No. 6 では水田や畑地が, No. 5, 27, 28 では畑地が広がっている。また, このタイプに属する湧水の周辺地域では下水道の整備が完了している。以上のことからこのタイプの湧水の汚染に関しても畑地による施肥が主な汚染源であると推測される。ただし No. 31, 32 の湧水周辺も畑地が多いため施肥などの影響が少なからず及んでいると考えられるが, 硝酸イオンは相対的に少なく, No. 32 ではほとんど検出されなかった。硝酸イオンが消失したとすると, その要因として湧出前の地下水が湿地, もしくは湿地流入前の台地斜面末端部などの地下水帯において自然浄化 (脱窒) 作用を受けた可能性が考えられる (田淵, 1975; Devito *et al.*, 2000; 井岡・田瀬, 2004)。しかし脱窒の有無を指摘するためには更なる調査が必要である。

以上に挙げた2つの水質タイプを持つ湧水の多くは, 硝酸イオンのほか, カルシウム, マグネシウム, 硫酸イオンを多く含むという特徴を持って

Table 3 つくば台地の水質特性と土地利用区分

地点名	水質タイプ	土地利用
5. 佐①	$\text{Ca} - (\text{SO}_4 + \text{NO}_3)$	林・畑
6. 佐②	$\text{Ca} - (\text{SO}_4 + \text{NO}_3)$	水田・畑
7. 佐③	$\text{Ca} - (\text{HCO}_3 + \text{NO}_3)$	水田・畑
15. 蓮沼	$\text{Ca} - (\text{SO}_4 + \text{NO}_3)$	宅地・畑
16. 吉沼	$\text{Ca} - (\text{SO}_4 + \text{NO}_3)$	宅地・畑
17. 柳橋	$\text{Ca} - \text{HCO}_3$	林 (工業団地)
18. おうまや池	$\text{Ca} - (\text{HCO}_3 + \text{NO}_3)$	宅地
19. 谷田部	$\text{Ca} - \text{HCO}_3$	林・宅地
20. 羽成	$\text{Ca} - (\text{SO}_4 + \text{NO}_3)$	宅地・畑
21. 下広岡	複合型①	宅地・水田
22. 榮泉寺	$\text{Ca} - (\text{HCO}_3 + \text{NO}_3)$	宅地・畑
23. 桜庁舎近く	$\text{Ca} - (\text{HCO}_3 + \text{NO}_3)$	宅地・畑
24. 上境	$\text{Ca} - (\text{HCO}_3 + \text{NO}_3)$	畑・林
25. 九重小学校・西	$\text{Ca} - (\text{HCO}_3 + \text{NO}_3)$	宅地
27. 前原・東	$\text{Ca} - (\text{SO}_4 + \text{NO}_3)$	畑
28. 前原・西	$\text{Ca} - (\text{SO}_4 + \text{NO}_3)$	畑
29. 花室	$\text{Ca} - (\text{SO}_4 + \text{NO}_3)$	宅地・畑
30. 若森	$\text{Ca} - \text{HCO}_3$	林・畑
31. 太田橋近く	$\text{Ca} - (\text{SO}_4 + \text{NO}_3)$	畑・宅地
32. 高山小学校・北	$\text{Ca} - (\text{SO}_4 + \text{NO}_3)$	畑
33. みずほ団地・北	複合型②	宅地・畑
34. みずほ団地・南	複合型②	宅地・畑
36. 畜産試験場・南	$\text{Ca} - (\text{HCO}_3 + \text{NO}_3)$	宅地・畑

いる。カルシウムとマグネシウムの起源は、肥料に含まれる溶成リンの副成分、もしくは土壌の酸性化の改善のために使用されている苦土質肥料の成分にあると推測される（田瀬，2004）。また硫酸イオンは主要な窒素肥料である硫酸アンモニウムも起源となっていると考えられる。

Ca-HCO<sub>3</sub>型にはNo. 17, 19, 30が該当する。このNo. 17, 19とNo. 30地点の水質は溶存成分量が異なるものの硝酸イオンが少ないため、汚染があるとは考えにくい。No. 17の上流は公園や工業団地が広がっているが、下水道は整備されている。またNo. 30では付近に産業廃棄物処理場があるものの、上流側のほとんどは林地で覆われ、土地利用の点においても汚染源は見当たらないことから、この3地点は汚染が進んでいないものと考えられる。

複合型として、No. 18は硝酸イオン濃度が高いほか、ナトリウムイオン濃度がカルシウムイオンより高いという特徴を持つ。周囲はほとんどが宅地として利用されており、下水道が整備されている。No. 21は硝酸イオンが比較的少ないものの、各イオン当量はほぼ同量であるという特徴を持つ。湧出地点の近傍には水田があるが、上流部はほぼ宅地で占められている。No. 33, 34では硫酸イオンが非常に少なく、硝酸イオンが多い。また、マグネシウムイオン濃度がカルシウムイオン濃度を超えており、ナトリウムイオンや塩素イオンの割合が高い点も特徴的である。この2地点の周辺では畑地や宅地が混在しているが、宅地では下水道が未整備である。従って、この2地点の湧水は農業系と生活排水系の両面の影響を受けていると推測される。

#### IV まとめ

茨城県つくば市に分布する湧水の湧出量や湧出機構、水質特性についての調査を行った結果、つくば市に分布する湧水は筑波山と筑波台地では大

きく異なる特徴を示した。それらをまとめると以下ようになる。

（筑波山）

- 1) 山腹地域では湧水は<sup>れっか</sup>裂罅型の湧出機構を持ち、湧出量はかなり少ない。また、この地域の湧水は溶存成分量が少ないことから、滞留時間が短く、雨水に近い地下水が湧出していると考えられる。
- 2) 山麓地域における湧水は斜面型 a の湧出機構であり、湧出地点によっては湧出量が多い。水質はCa-HCO<sub>3</sub>型を示し、その起源としてこの地域を構成する花崗岩や斜面堆積物に含まれる斜長石、特に灰長石やはんれい岩から溶出したものと推測される。
- 3) 南部山地の湧水は斜面型 b の湧出機構を持ち、湧出量が多い地点が目立つ。湧水が分布する標高や湧出形態は山麓地域に近いが、Na-(HCO<sub>3</sub>+Cl)型の水質を示す。それらの物質はこの地域を構成する変成岩や堆積した風化土に含まれる斜長石から溶出し、形成されたものに由来すると考えられる。

（筑波台地）

- 1) 湧出機構は崖線型、谷頭型、池型の3タイプに分かれるが、崖線型の湧水が大半を占めている。湧出量は上流部では相対的に多いが、全体として少量である。
- 2) 筑波山に比べて高い硝酸イオン濃度が検出された。また、水質進化の方向は無機汚染に向かっており、この地域の湧水は水質汚染が進んでいることが示された。
- 3) Ca-(HCO<sub>3</sub>+NO<sub>3</sub>)型とCa-(SO<sub>4</sub>+NO<sub>3</sub>)型の水質を持つ湧水が多く、この2タイプの水質が筑波台地における代表的な汚染タイプであるといえる。土地利用は宅地や林地の多い地点もあるが、いずれの場合も畑地が混在しているか、または畑地が大部分を占めている。ほとんどの地域で下水道の整

備が完了していることから、主な汚染源は畑地における施肥などであると推測される。

- 4) No. 33, 34 の湧水は硫酸イオンがほとんど含まれておらず、硝酸イオンやナトリウムイオン、塩素イオンの割合が高い。この2地点の周辺は宅地や畑地が混在しており、下水道も未整備のままである。従って、畑地での施肥による影響のほか、生活排水なども影響して水質汚染に繋がっているものと考えられる。

以上の結果から、筑波山の湧水は地形・地質的要因によって特徴付けられ、3つのグループに分類することができた。一方、筑波台地に分布する湧水は土地利用に大きく支配され、湧水の多くでは水質汚染が進行していることが明らかとなった。

## 謝辞

本研究を進めるにあたり、茨城県つくば市役所環境保全部、都市建設部下水道事務所の担当の方々には多くの貴重な資料や有益なご助言をいただきました。また、筑波大学環境科学研究科の関口陽高氏（現：前田工織）、吉田 顕氏にはフィールド調査において惜しめない協力をいただきました。さらに筑波大学環境科学研究科流域環境研究室の大学院生の方々にも有益なご助言をいただきました。査読者の先生方にも懇切丁寧な御指摘をいただきました。ここに記して深く御礼申し上げます。

本研究は、筑波大学学内プロジェクト（筑波山における気象・水文環境の高精度モニタリングによる大気・水循環場の解明）の成果の一部である。

## 文献

井岡聖一郎・田瀬則雄（2004）：茨城県筑波台地、

斜面－湿地プロットでの地下水帯における硝酸イオンの還元場。地下水学会誌, **46**, 131-144.

池田 宏（2001）：「地形を見る目」。古今書院, 152p.

磯部一洋（1990）：茨城県筑波山・加波山周辺の緩斜面堆積物の形成について。地質調査所月報, **41**, 357-371.

井野盛夫（1987）：富士山東南西麓の湧水。ハイドロロジー, **17**, 63-74.

宇野沢 昭・磯部一洋・遠藤秀典・田口雄作・永井 茂・石井武政・相原輝雄・岡 重文（1988）：2万5千分の1筑波研究学園都市及び周辺地域の環境地質図説明書。特殊地質図(23-2), 地質調査所, 139p.

環境省環境管理局水環境課（2005）：「平成16年度地下水質測定結果」。44p.

佐藤芳徳・安池慎治・河野 忠・北川光雄・鈴木裕一・高山茂美（1997）：富士山周辺の湧水および地下水の水質について。日本水文科学会誌, **27**, 17-25.

嶋田 純（1985）：筑波トンネルの掘削に伴う結晶質岩中の地下水挙動と水質変化。ハイドロロジー, **15**, 42-54.

島野安雄（1994）：阿蘇火山東麓地域における湧水・河川水の水文化的研究。宇都宮文星短期大学紀要, **5**, 17-37.

島野安雄（1997）：阿蘇カルデラ内における湧水の水文化的研究。宇都宮文星短期大学紀要, **8**, 43-67.

島野安雄（2001）：阿蘇火山西麓地域における湧水・河川水の水文化的研究。宇都宮文星短期大学紀要, **12**, 3-36.

関 陽児・金井 豊・上岡 晃・月村勝宏・濱崎聡志・金沢康夫・中嶋輝允（1999）：採石場の湧水からみた地質と地下水質との関係－八溝山地周辺の例－。地質調査所月報, **50**, 683-697.

- 田瀬則雄 (2003): 硝酸・亜硝酸性窒素による水質汚染の現状と動向. 水環境学会誌, **27**, 24-30.
- 田瀬則雄 (2004): 硝酸・亜硝酸性窒素による地下水汚染の現状と動向. 環境管理, **40**, 255-263.
- 田淵敏雄 (1975): 農地排水と水質汚濁－水田肥料の流出－. 農業土木学会誌, **43**, 525-529.
- つくば市市長公室行政経営課編 (2005): 「統計つくば 2004」. つくば市, 109p.
- つくば市市民環境部環境課 (2004): つくば湧水探検マップ. つくば市市民環境部環境課, 9p.
- 鶴巻道二 (1989): 地下水の挙動を水質から診る. 地盤を観る・視る・診る. 中世古幸次郎教授退官記念論文集, 29-45.
- 東京地下水研究会編 (2003): 「水循環における地下水・湧水の保全」. 信山社サイデック, 254p.
- 永井 茂 (1991): 地下水汚染の水文化学的アプローチ－無機汚染の実態と問題点－. 地下水学会誌, **33**, 145-154.
- 日本地下水学会編 (1994): 「名水を科学する」. 技報堂出版, 299p.
- 日本地下水学会編 (1999): 「続・名水を科学する」. 技報堂出版, 246p.
- 吉谷純一・木内 豪・戸嶋光映・賈 仰文・倪 广恒・河原能久 (2001): 茨城県谷田川流域における地下水位と地下水水質の実態調査. 土木技術資料, **43**, 50-55.
- Devito, K. J., Fitzgerald, D., Hill, A. R. and Aravena, R.(2000) : Nitrate dynamics in relation to lithology and hydrologic flow path in a river riparian zone, *Journal of Environmental Quality*, **29**, 1075-1084.

(2006年5月31日受付, 2006年9月28日受理)

