短 報

都市湧水・真姿の池における従属栄養細菌群集の 動態におよぼす降雨の影響

永翁 一代・森川 和子

摘 要

武蔵野台地にある都市湧水・真姿の池において、1999年6月より9月まで梅雨期を中心に採水を行い、従属栄養細菌数 (CFU) と環境要因の調査を行った。調査期間中、水温は16℃で一定であり、pHは6.2～7.0、ECは179～201 $\mu\text{S cm}^{-1}$ の間で変動した。CFUは $3.2 \times 10^2 \sim 7.9 \times 10^2 \text{ CFU mL}^{-1}$ の間で変動し、変動パターンは降雨に遅れて増加し、その後減少する傾向がみられた。湧水量は調査日までの40日間積算降水量と有意の相関を示した。 Cl^- 、 NO_3^- 、 SO_4^{2-} 、 Na^+ 、 Mg^{2+} 、 Ca^{2+} のイオン濃度と40日間積算降水量の変動は、負の相関を示した。これに対し、CFUは、40日間積算降水量の変動と正の相関を示した。これらの結果は、CFUの変動は溶存イオンのように単に水量に希釈されて変動しているのではない事を示している。真姿の池湧水の従属栄養細菌は、積算降水量の増加に伴う地下水量や流速の増加にともない、土壌や帯水層堆積物から流入して増加していることが示唆された。

キーワード：従属栄養細菌数、湧水、積算降水量

はじめに

都市湧水は、災害時の飲料水の確保や親水空間として注目されており、様々な調査が行われている。湧水を調査することは、サンプリングが困難な地下水や水文学的な情報を得る手助けとなる。東京都西部の武蔵野台地においても、湧水の流出機構 (平野・小倉, 1992, 土屋, 1998)・水循環機構 (安藤・長畑, 1989) の解明、水質、特に有機塩素化合物 (宮崎・小倉, 1994) や、硝酸汚染 (Kato and Ogura, 1992) について報告されている。著者らは、これまで湧水中の細菌群集の動態を明らかにするため、東京都の武蔵野台地にある真姿の池湧水を中心に調査解析を行ってきた。そして前報で、湧水細菌群集の経年変動について報告した (永翁・森川, 1999)。1993年～1994年に行った経年変動の調査結果から、湧水中の従属栄養細菌数が、降雨との関連を持って変動していたことが示唆された。

本報では、降雨が湧水中の従属栄養細菌数におよぼす影響についてさらに詳しい検討を加えるため、まとまった降雨が期待される梅雨期を中心に調査を行った結果を報告する。

材料及び方法

調査地点

真姿の池湧水は、東京都西部の武蔵野台地の武蔵野面と立川面を分ける国分寺崖線から湧出する野川の湧水群のひとつである。採水地点の詳細は前報に記した (永翁・森川, 1999)。真姿の池湧水の後背の武蔵野面では、表層に厚さ数 m から10 m の関東ローム層がのり、その下に2～7 m の厚さで武蔵野礫層が分布している。さらに、その下に粘性土層、砂質土層、砂礫層が互層をなす基盤層が続いている。武蔵野面に降った雨は、ローム層を浸透して礫層に達し、基盤層が地下水の支えとなり礫層内に不圧地下水帯が形成される。基盤層の砂礫層と武蔵野礫層が線状に接する場所では、帯水層の厚さが増し透水量が増大し、水みちを形成する。真姿の池湧水群は、その水みちが国分寺崖線で断ち切られて形成されたものである (富樫・斉藤, 1997)。

試料の採取

調査は、1999年6月から9月に行った。細菌計数用には100 mL滅菌ポリビンに、水質分析用には1 L ガラスビンに湧き口より直接採水した。採水した試料は現場水温

に保ち研究室に持ち帰った後、2時間以内に細菌計数のための処理を行った。水質分析用の試料は Whatman GF/C フィルターで濾過後、 -20°C で凍結保存した。

従属栄養細菌数の計数

採水した試料を1/8 PYG 平板（ポリペプトン0.25 g, イーストエキス0.125 g, グルコース0.062 g, 寒天15 g, 水道水1 L, pH 7.0 ~ 7.2）に0.1 mL ずつ平面塗抹した。接種後、 20°C で新たなコロニーが生じなくなるまで少なくとも1ヶ月間培養して、形成されたコロニー数を計数し1 mL あたりの従属栄養細菌数（colony forming unit: CFU）をえた。

水質分析

気温、水温、流速、水深、pH、電気伝導度（EC）を現場で測定した。また、陰イオン分析は、塩素イオン（ Cl^{-} ）、硝酸イオン（ NO_3^{-} ）、硫酸イオン（ SO_4^{2-} ）についてイオンクロマトグラフ装置（ダイオネックス社 DX100）を用いて測定した。溶離液は、1.8 mM Na_2CO_3 と1.7 mM NaHCO_3 の混合液を用い、カラムは IONPAC AS4A-SC（ダイオネックス社）を使用した。陽イオン分析は、ナトリウムイオン（ Na^{+} ）、アンモニウムイオン（ NH_4^{+} ）、カリウムイオン（ K^{+} ）、マグネシウムイオン（ Mg^{2+} ）、カルシウムイオン（ Ca^{2+} ）についてイオンクロマトグラフ装置（ダイオネックス社 DX300）により測定した。溶離液は、1.3 mM メタンスルホン酸を用い、カラムは IONPAC CS12（ダイオネックス社）を使用した。なお、TOC、 $\text{NH}_4^{+}\text{-N}$ 、 $\text{NO}_2^{-}\text{-N}$ 、RP、TP の値は検出限界以下であった（永翁・森川，1999）。降水量は東京管区気象台編集の東京都気象月報の府中降水量のデータを用いた。

結 果

降水量の変動

1999年5月～9月までの降水量の変動を Fig. 1 に示した。6月上旬には降水はほとんどなく、中旬以降10 mm day^{-1} 前後の降水が続く、下旬から7月上旬にかけて30 mm day^{-1} を越す降水があった。7月中旬に、10～67 mm day^{-1} のまとまった降雨があり、以後降水量の少ない日が続いた。そして8月14日には224 mm day^{-1} の大雨があった。その後低い降水量の日があり、9月下旬に74 mm day^{-1} の降雨があった。

Fig. 1. Fluctuations in the rainfall at Fuchu from May to September 1999.

Fig. 2. Fluctuations in the pH (□) and EC (◆) at Masugatanoike Spring from June to September 1999.

水質の変動

真姿の池湧水調査地点の水温は 16°C で一定であり、気温の影響を受けていなかった。pH、EC の変動を Fig. 2 に示した。pH は6月からあがりはじめ、8月中旬下降した後、再び上昇した。最高7.0、最低6.2で、平均は6.6の弱酸性であった。EC は、6月から7月中旬までは $190 \mu\text{S cm}^{-1}$ 前後で一定であったが、下旬以降一時減少した後上昇し、8月中旬大雨後減少して上昇した。最高値は $201 \mu\text{S cm}^{-1}$ 、最低値 $179 \mu\text{S cm}^{-1}$ で、平均は $187 \mu\text{S cm}^{-1}$ であった。これは真姿の池湧水の水質調査についての他の報告とほぼ同程度の値である（上田ら，2000，吉田・小倉，1978）。

湧水中のイオン濃度の変動を Fig. 3 に示した。調査期間の各イオン濃度、 Cl^{-} は $0.293 \sim 0.381 \text{ mM}$ 、 NO_3^{-} が $0.329 \sim 0.457 \text{ mM}$ 、 SO_4^{2-} は $0.060 \sim 0.098 \text{ mM}$ で変動し、 Na^{+} は $0.427 \sim 0.504 \text{ mM}$ 、 K^{+} は $0.007 \sim 0.012 \text{ mM}$ 、 Mg^{2+} が $0.248 \sim 0.304 \text{ mM}$ 、 Ca^{2+} は $0.242 \sim 0.317 \text{ mM}$ の間で変動した。各イオン濃度の比率は調査期間中はほぼ一定であった。これらイオン濃度の変動は6月中旬の値から降雨の続いた7月中旬に徐々に減少し、8月上旬から増加傾向に転じた。そして 200 mm day^{-1} を越す大雨の後急激に減少し、その後、ゆるやかに増加するとい

Fig. 3. Fluctuations in the concentration of Cl^- (◆), NO_3^- (■), SO_4^{2-} (▲), Na^+ (□), K^+ (△), Mg^{2+} (○) and Ca^{2+} (◇) at Masugatanioke Spring from June to September 1999.

う共通したパターンがみられた。これら各イオン濃度は、降雨量増減と連動して増減していた事になる。

従属栄養細菌数の変動

真姿の池湧水中の CFU は、調査期間中、 $3.2 \times 10 \sim 7.9 \times 10^2 \text{ CFU mL}^{-1}$ の間で変動した (Fig. 4)。降水前の6月中は 10^2 CFU mL^{-1} 前後で変動したが、中旬の雨の降り始めからやや遅れて CFU の増加が見られた。7月中旬のまとまった降雨の後、CFU は増加し、再び減少した。8月の大雨に伴い CFU は増加し、その後減少した。そして9月には、梅雨期前と同程度の値に戻った。

Fig. 4. Fluctuations in the number of heterotrophic bacteria at Masugatanioke Spring and in the rainfall at Fuchu from June to September 1999.

Table 1. Correlation coefficients between the number of heterotrophic bacteria and environmental factors at Masugatanioke Spring from June to September 1999 (**: $p < 0.001$, *: $p < 0.01$).

	Atmospheric temperature	Water temperature	pH	EC	Water depth	Flow rate	Rainfall	Cl^-	NO_3^-	SO_4^{2-}	Na^+	K^+	Mg^{2+}	Ca^{2+}
CFU	0.412	-0.110	-0.047	-0.609**	0.514*	0.438	-0.194	0.072	-0.250	-0.553**	-0.322	0.121	-0.204	-0.389

CFU と降水量の変動パターンとを比較すると、湧水中の CFU は、降水量の増減にややおくれて変化したことが明らかであった。

従属栄養細菌数と環境要因との関係

CFU と環境要因との相関関係を Table 1 に示した。調査期間中の CFU の変動は、水深の変動と正の相関 ($p < 0.01$) を示し、EC と SO_4^{2-} の変動と負の相関 ($p < 0.001$) を示した。

考 察

降雨が湧水量に与える影響

真姿の池湧水は、主として降雨により涵養されている。しかし、湧水量の目安となる湧水の池部分の水深、流速ともに採水日当日の降水量とは有意の相関関係はみられなかった。このことは、当日の降水がただちに湧出していない事を示している。

前報の1993年3月から1994年10月までの調査では流速を測定していなかった。そこで、降水量と湧水量の関係を明らかにするために、湧水量の目安として水深を用いて、調査日までの積算降水量との関係を検討した。前報の全調査期間の結果では、水深と積算降水量との関係は、40日間の積算値で $r=0.817$ 、50日間では $r=0.842$ であり、80日間で $r=0.894$ と最も高かった (永翁・森川,

1999)。本調査（1999年6月～9月）における水深と積算降水量との関係は、40日間が $r=0.912$ 、50日間では $r=0.921$ 、60日間では $r=0.897$ となり、50日間積算降水量と水深との関係が最も高い相関を示した。両調査の結果を比較するため、1993～1994年の調査における6月から9月までの値を抽出して水深と積算降水量の関係をみると、50日間が $r=0.964$ と最も高く、80日間では $r=0.915$ となった。これらの結果は、まとまった降水がある梅雨期には、年間を通した他の時期よりも降雨が短い期間で湧出してくることを示している。

しかし、湧水量の目安としては、水深だけでなく流速も大切な要素である。そこで、本調査では水深と流速を乗じた値を湧水量と仮定し、調査日までの積算降水量との関係を検討した。湧水量と調査日から遡って積算した降水量との関係は、30日間が $r=0.520$ ($p<0.01$)、40日間では $r=0.602$ ($p<0.001$)、50日間では $r=0.523$ ($p<0.01$) となり、40日間積算降水量が湧水量と最も高い相関関係を示した。この結果は、40日間遡った期間に降った雨量によって、梅雨期の湧水量が変動していたことを示唆している。

降雨が湧水の水質に与える影響

湧水量と最も高い相関を得られた40日間積算降水量を用いて、各イオン濃度との関係を Fig. 5 に散布図で示した。これら各イオン濃度は、いずれも40日間積算降水量と有意の負の相関関係がみられた (Cl^- ; $p<0.01$; NO_3^- , SO_4^{2-} , Na^+ , Mg^{2+} , Ca^{2+} ; $p<0.001$)。また、EC の変動も、積算降水量のうちで、40日間が最も高い有意の負の相関を示した ($r=-0.603$, $p<0.001$)。これは、湧水量が増加したことで、イオン濃度が希釈されたことを示している。

真姿の池付近の降水の Cl^- 濃度は約 1 mg L^{-1} であり (吉田・小倉, 1978), 今回調査した Cl^- の平均濃度 12.2 mg L^{-1} よりもかなり低い。また、真姿の池湧水中の NO_3^- は降水起源が10%程度であったことが報告されている (吉田・小倉, 1978)。さらに、平野・小倉 (1992) は、真姿の池湧水において、豪雨による増水時の流量が、雨水によって供給された新しい水塊によって構成されていることを示唆しており、イオン濃度が降雨により希釈されたという今回の結果と一致する。

Fig. 5. Relationships between the concentration of each ion (Cl^- (A), NO_3^- (B), SO_4^{2-} (C), Na^+ (D), Mg^{2+} (E) and Ca^{2+} (F)) and the rainfall summed for 40 days before the sampling day at Masugatanoike Spring from June to September 1999.

Fig. 6. Relationships between the number of heterotrophic bacteria and rainfall summed for 40 days before the sampling day at Masugatanioike Spring from June to September 1999.

降雨が湧水中の従属栄養細菌数に与える影響

CFUの変動を考察するため、湧水量と最も高い相関が得られた40日間の積算降水量とCFUとの関係をFig. 6に示した。この関係は、先に述べた各イオン濃度との関係とは逆に、有意の正の相関関係を示した($r=0.548$, $p<0.001$)。これは、CFUが測定した各イオン濃度のように降水量の増加に伴い希釈されるのではなく、短期間に降水量が増加することによって、土壌や帯水層堆積物から従属栄養細菌が押し出され、湧水中に流入したことを示している。

1993年から1994年の調査では、降水量にかかわらず従属栄養細菌数が一定の部分(a)と、積算降水量が増加するに従って細菌数が増加する部分(b)、降水量の積算値が高く細菌密度が減少したと見える区分(c)の3つの区分が認められた(永翁・森川, 1999)。6月から9月に行った本調査では、CFUと積算降水量との関係に、前回の調査でみられたa, b, cの区分は明確にされず、積算降水量が多くなると湧水中のCFUが増加するbの傾向($r=0.548$)がみられた。

湧水と同じ流水系である河川では、周囲の土壌から従属栄養細菌の流入する洪水時を除き、河川水中の従属栄養細菌数は降水によって希釈されることが報告されている(森川, 1984)。湧水は降水が直接流入するのではなく、土壌や、地下堆積物中を通過して湧出してくるため、河川とは異なった降雨の影響の受け方をするのであろう。

つまり、降水量が増加すると、①土壌から地下水へ流入する細菌数が増加したり、②地下水位の上昇によって、それまで冠水していなかった不飽和帯水層から細菌が流入したり、③地下水の流速が増加するため、帯水層に生息している細菌が剥離することによって、湧水中の従属栄養細菌数が増加することなどが考えられる。

本報告は、湧水におけるイオン濃度とCFUの変動を比較検討することによって、細菌群集は溶存する化学物質とは異なる挙動を示すことを明らかにした。

謝 辞

本研究を行うにあたり、水質分析に関して東京都立大学の落合正宏博士にお世話になりました。ここに報告して感謝の意を表します。

文 献

- 安藤義久・長畑範明(1989): 台地の試験流域における地下水流動を含む水循環機構のモデル化とその応用. 水文・水資源学会誌, 2: 33-40.
- 平野晃章・小倉紀雄(1992): 水質変動からみた湧泉の湧出機構推定の試み. 水利科学, 36: 63-79.
- Kato, H. and N. Ogura (1992): Nitrate nitrogen in ground waters in the Kitatama area of Tokyo. Japanese Journal of Limnology, 53: 265-272.
- 森川和子(1984): 多摩川上流域における好気性従属栄養細菌数の季節変動とその環境要因との関係について. 陸水学雑誌, 45: 69-78.
- 宮崎礼子・小倉紀雄(1994): 真姿の池湧水群を中心とした浅層地下水の揮発性有機塩素化合物の濃度比. 地下水学会誌, 36: 451-459.
- 永翁一代・森川和子(1999): 都市湧水・真姿の池の細菌群集の変動とその要因. 陸水学雑誌, 60: 177-184.
- 富樫均・斉藤泰久(1997): 真姿の池湧水群形成における地質構造規制. 環境地質学シンポジウム講演論文集, 7th: 179-184.
- 土屋十園(1998): 都市中小河川の水文環境(その2) - 湧水の流出特性 -. 水利科学, 41: 18-34.
- 上田敏雄・水野健一郎・飯野竜一・大平範行・中村静也・麻生純子(2000): 東京都の湧水の現況. 地下水学会誌, 42: 235-241.
- 吉田和広・小倉紀雄(1978): 野川湧水中の硝酸塩濃度とその起源. 地球化学, 12: 44-51.

永翁一代：〒183-8509 東京都府中市幸町3-5-8，東京農
工大学大学院連合農学研究科
森川和子：〒183-8509 東京都府中市幸町3-5-8，東京農
工大学大学院連合農学研究科

（受付：2000年12月11日；受理：2001年4月20日）

[Note]

Influence of rainfall on the bacterial community at the urban spring Masugatanoike

Kazuyo NAGAOSA and Kazuko MORIKAWA

Tokyo University of Agriculture and Technology,
Saiwaicho 3-5-8, Fuchu, Tokyo 183-8509, Japan

Abstract

Fluctuations in the density of heterotrophic bacteria (colony forming units: CFU) and environmental factors were studied from June to September 1999 at the urban spring Masugatanoike in the southern Musasino upland of Tokyo, Japan. Water temperature was constant at 16 °C, pH ranged from 6.2 to 7.0, and EC fluctuated between 179 and 201 $\mu\text{S cm}^{-1}$. The CFU in water fluctuated between 3.2×10 and 7.9×10^2 CFU mL^{-1} , increasing after rainfall and then decreasing. The discharge was correlated to the rainfall summed for 40 days before the sampling day. Fluctuations in the concentrations of Cl^- , NO_3^- , SO_4^{2-} , Na^+ , Mg^{2+} and Ca^{2+} have a negative association with that of the rainfall summed for 40 days before the sampling day. In contrast, the CFU fluctuations had a positive association with the rainfall summed for 40 days. These results suggested that the CFU should not fluctuate by the dilution of rainfall. The CFU in spring water at the Masugatanoike might have increased when the summed rainfall increased because of increasing heterotrophic bacteria originating from the aquifer or soil.

Key words: heterotrophic bacteria, spring water, summed rainfall

E-mail (K. Morikawa): mic.eco@cc.tuat.ac.jp