一湧水における水質の経日変化と地域環境要因*

田中芳則**・中山千栄子***・廣瀬寛幸****

Daily Change of Spring Water Quality in Response to Environmental Conditions *

Yoshinori TANAKA **, Chieko NAKAYAMA *** and Hiroyuki HIROSE ****

Abstract

The flow rate and water quality of a spring were monitored continuously for two years in western Saitama Prefecture. Precipitation resulted in a marked increase in the groundwater level and flow rate of the spring with nitrogen-nitrate concentration. The combination of farming as the dominant land use type and a shallow water table in the area were considered to be responsible for the supply of soluble compounds such as a nitrogen-nitrate to the groundwater. The concentration of nitrogen-nitrate in the groundwater was closely related to the frequency and amount of fertilizer application. Simulations of flow rate and water quality were conducted for the spring using a groundwater tank model describing the daily decrease of fertilizer in soil. The findings revealed that the movement of soil water due to rain infiltration was responsible for the daily fluctuations observed in spring water quality.

Key Words: spring, flow rate, nitrogen-nitrate, farmland, fertilizer, groundwater tank model

要 旨

埼玉県西部の一湧水を対象として、2年間にわたって湧水量と硝酸態窒素を中心とした水質を継続観測した。降雨時に地下水位の上昇、ならびに湧水量の増加は顕著であり、湧水中の硝酸態窒素濃度も増加する。地下水中に硝酸態窒素などの可溶物質が取り込まれる地域環境条件としては、雨水が浸透しやすい畑地を主とした土地利用状況と浅い地下水位があげられる。湧水中の硝酸態窒素濃度は畑地への肥料投入時期、投入量ならびに降雨量と密接に関係する。投入肥料の経日的消失を考慮した地下水タンクモデルを用いて、湧水量と湧水水質に関するシミュレーションを行った結果から、雨水浸透に伴う硝酸態窒素の地下水への押し出しが推定された。

キーワード: 湧水、湧水量、硝酸態窒素、畑地、肥料、地下水タンクモデル

* 2003年度日本地下水学会秋季講演会にて一部発表

** 東洋大学工学部環境建設学科 ()

Department of Civil and Environmental Engineering, Faculty of Engineering, Toyo University

*** 東洋大学大学院工学研究科

Graduate School of Engineering, Toyo University

**** (株)フォーラムエンジニアリング

Forum Engineering Inc.

1. はじめに

近年、環境意識の高まりにつれて、都市近郊の湧水は昔からの著名な湧水地に限らず、地域の自然環境を代表する貴重な存在として意識されるようになってきた。しかしながら、その一方で湧水地周辺の都市化の進行は湧水の枯渇や水質悪化をもたらす原因にもなっており、近年になって消滅した湧水も数多い。この状態を懸念して、湧水地周辺の住民が湧水の維持管理や修復、あるいは湧水をテーマとした環境教育を行うといった活動も目立つようになってきている。活動の一環として、湧水量や水質を計測した例もしばしばみられ、それらは今後に残る貴重なデータを提供している。東京都などの自治体においては、湧水を水環境保全の重要な対象と見なし、地下水学的視点での研究も実施されている（国分ほか、2000、2003）。

湧水保全の第一の関心は水量の確保であるが、最近では水質、特に土中に吸収され難く下流水域の富栄養化につながる硝酸態窒素濃度の実態が注目されている。しかしながら、これまでに湧水中の硝酸態窒素が継続的に測定された例は多くはない。このようなことから、本文では埼玉県西部に位置する一湧水を対象として、2年間にわたって湧水量と硝酸態窒素を中心とした水質を継続観測した結果を示すとともに、湧水量と水質に影響を与えた諸要因につき分析した結果を報告する。

2. 調査域の概要

埼玉県西縁部に沿って武蔵野台地の北方延長域に当たる台地が広がっている。大小の河川がこの台地を刻んで東流し、河川沿いの台地縁辺部および台地末端部には、多数の湧水がみられる。本文で取り上げる八幡神社湧水もその代表的な一つである。

八幡神社湧水は、埼玉県川越市の北東縁に位置し、入間台地を刻む小畦川に面した段丘崖下に湧出する（図1）。日湧出量は $200\sim400\text{m}^3$ あり、年間を通じてこれまで涸れたことはない。湧水地は周辺住民の憩いの場として整備・利用され、また、下流側水田に対する水源にもなっている。湧

水の後背地に当たる台地面は従来、畑地と林を主とする農村地であったが、近年は一般住宅やアパートの進出も目立つようになった。

3. 水理地質状況

入間台地の地質および水理地質については、入間台地の中央に位置する鶴ヶ島市がまとめた「鶴ヶ島の地質」（1990）がもっとも新しい研究成果を記しているのので、ここでは地層区分ならびに地質分布を同書に沿って説明する。同書によれば、入間台地の地質は上位より関東ローム層、武蔵野礫層、鶴ヶ丘粘土層、金子礫層、飯能礫層に区分されている。

図2に本地域で掘削されたボーリング結果の中から、八幡神社湧水の集水域とみられる範囲内の代表的な地質柱状図を示す（ボーリング位置は図3参照）。最上位の関東ローム層は約4mの厚さがあり、立川ロームならびに武蔵野ロームに当たるが、両者を肉眼で区別することは困難である。関東ローム下には厚さ数10cm～1mの白色粘土があり、鶴ヶ丘粘土層と呼ばれる。この粘土層は下末吉ローム層に相当するが、欠落することも多い。この下位の厚さ約10mの砂礫層は金子礫層に当る。入間台地以南の武蔵野台地では所沢礫層と呼ばれ下末吉層に対比される（田中・土屋、1989）。この礫層は入間台地に広く分布し、台地東半部では浅層地下水の主たる帯水層となってい

図1 調査位置図（中央のボックス内が調査範囲）

Fig. 1 Map showing the study area

る。柱状図の13m以深は砂礫と粘土の互層となっている。この互層は非常に締まっていて硬質であることから前期更新統の飯能礫層と思われるが、詳細は不明である。

八幡神社湧水後背地の台地表面上には、現在は雑用水としてのみ利用される素堀井戸が点在する。井戸深さは一部の宙水から取水する井戸を除くと

4~9mで、金子礫層中の浅層地下水を対象としている。無降雨時の水位は地表面下1.5~4mときわめて浅い。図3に各井戸の水位測定値を利用して作成した地下水面図を示す。入間台地は南西側が高く北東方向に傾斜し、地層も同方向に傾斜する。浅層地下水の流動方向も同傾向にあり、八幡神社湧水の集水域は地下水位等高線の形状から判断して図中に示すように南西方向にあると推定される。その南西側の集水範囲の限界は八幡神社湧水の年間を通じて涸れることのない湧水量からみて、図3に示した範囲を超えるかと推定される。しかしながら、さらに南西側は住宅団地を含む新興市街地にかかって地下水位情報が得られないため、集水範囲を延長して限定することは困難である。

4. 湧水後背地地下水の水質と経日変化

八幡神社湧水後背地を含む範囲の地下水水質の特徴をあらわすものとして硝酸態窒素と電気伝導度を取りあげ、両者の分布をあわせて図3中に示す。測定に際して、硝酸態窒素は富栄養計（セントラル科学、HC-1000）、電気伝導度は携帯型導電率計（セントラル科学、UC-35）を用いた。調査範囲においては、環境省が地下水中の硝酸態窒素および亜硝酸態窒素について定める環境基準値10mg/Lを超える井戸が、調査域の北側の部分に多く分布した。

湧水後背地の地下水位は浅いので、降雨に伴う水位変化が顕著である。図4に示した井戸中の水位変化にみられるように、降雨に対する応答は早い。しかし、日雨量20mm未満の降雨に対しての水位上昇はほとんどみられない。図中、2003年8月には台風10号の影響もあって、11日間で382mmの降雨量があった。このときの地下水位上昇量は、図中に示した井戸において2~3mに及んだ。このような場合、地表近辺の土中に保持されていた可溶物質が雨水の浸透に伴って地下水中に降下することに加えて、地表近くまで上昇した地下水が可溶物質に直接にふれて地下水中に取り込みやすくなると考えられる。

雨水の浸透が地下水水質に与える影響は濃度上昇をもたらすこともあれば、逆に希釈することも

図2 ボーリング柱状図 (位置を図3中に示す)

Fig. 2 Boring log at the site shown in Fig. 3

ある。どちらになるかは対象とする成分やその場所の土地条件によって異なる。図5に示した例では、硝酸態窒素濃度および溶存イオン総量と関係の深い電気伝導度が井戸中の水位上昇に伴って増加している。地下水面は2003年8月の最高水位時には、地表下60cm (G.L.27.9m に対し水位標高27.3m) の位置にまで達し、土中の可溶成分が多く取り込まれたようである。地下水の出口である湧水の水質には、後背地におけるこのような雨水浸透・地下水位変動と溶存物質濃度との関係が総合的にあらわれると考えられる。

5. 八幡神社湧水の水質と経日変化

湧水と地域環境との関係を求めるため、八幡神社湧水の湧出量と水質を2002.3.1~2004.3.31の2年間にわたって計測した。湧出量は、湧水が池底に湧出しているのもので、その出口に当たる排水孔口にて計量した。水質測定のうち、電気伝導度、硝酸態窒素については、井戸地下水の場合と同じ測定器を用い、pHについては携帯型PHメータ(横河電機、PH81)を使用した。湧出量と水質の測定は1~7日に1回行い、降雨前後にわたって湧出量変化が大きいと予想される場合には、計測間隔を短縮した。

図3 地下水面図 (2002. 11. 04) および地下水水質の分布 (2003. 10. 26~28)

Fig. 3 Map of groundwater table and distribution of groundwater quality

各種計測結果のうち、全期間にわたって連続的な結果が得られた湧出量、pH、電気伝導度、硝酸態窒素の各測定値を図6に示す。湧出量はおおむね3 L/s 前後であったが、2003年の台風10号と続く豪雨の際には前述した井戸水位の上昇に伴って倍増した。湧出量の降雨に対する応答は井戸における地下水位応答と同じく早く、特に日雨量40mm以上の降雨の場合の湧出量増加は顕著である。pH値は7~9とややアルカリ性を示し、降雨量ならびに湧出量が多いとpH値が低下する傾向が見られる。

電気伝導度と硝酸態窒素は期間を通じて変化の傾向が類似しており、両者は正の相関関係にある。両者の測定値の降雨量ならびに湧出量に対する関係はpH値の場合とは逆であって、図5の井戸における水質変化と同様に、降雨量ならびに流出量が多くなると電気伝導度および硝酸態窒素濃度が大きくなる。このことは降雨の際に湧水集水域にこれらの測定値の増加をもたらす地域条件があることを意味するので、次に地域条件を考慮したモデルを用いて八幡神社湧水の湧出量ならびに湧水水質の変化を検討する。

図4 いくつかの井戸における地下水位 (図3中の井戸A、B、C、D)

Fig. 4 Groundwater level at the well A, B, C and D shown in Fig. 3

図5 地下水位の変化と水質 (図3中の井戸B)

Fig. 5 Change of groundwater level and water quality at the well B shown in Fig. 3

6. 湧水シミュレーション

6.1 地域条件とモデル関連要素

八幡神社湧水に関わる地域条件として、土地利用状況を取り上げる。図3において推定した湧水集水域とその周辺の土地利用状況を図7に示す。土地利用は畑地、林、閑地の多い住宅を主とし、西方には住宅密集地が分布する。閑地の多い住宅区域の中には、図中では省略した小規模の点在する畑地も含まれる。湧水集水域内で畑地と林地はそれぞれ1/3の面積を占め、雨水が直接浸透しやすい状況にある。湧水水質に関わる地域条件として何を取り上げるべきかは目的とする水質項目により対象が変わるものである。ここでは以上の土地利用状況からみて関係が深いとみられる硝酸態窒素に注目し、その経日的変化を示すモデルを考える。

集水域内の窒素供給源としては、林地の土壌有機物の分解に由来する供給、家庭排水、畑地の肥料が挙げられる。集水域内には公共下水道処理域外となる区域があり、住宅の一部は浄化槽からの排水を地中浸透させている。家庭排水の地中浸透と林地の土壌有機物が地下水中の硝酸態窒素に与える影響の実態を知ることは困難であったので、一定量の濃度をモデルに組み込むことにし、湧水における窒素の主たる供給源は畑地の肥料由来とみなしたモデルを作成することにした。

集水域内の畑地の生産物は大根、ほうれんそう、こまつ菜などの各種野菜と茶である。これらの農業生産のために使用される肥料量の年間推移を知るために、入間台地の農地を対象として化成

図6 湧水水量と水質の測定結果

Fig. 6 Observation results of flow rate and water quality on the spring

肥料、配合肥料、硫安、堆肥など各種肥料を供給しているJAいるま野北部営農センターの出荷記録を用いることにする。北部営農センターにおける2002年および2003年の肥料出荷量記録より肥料中の窒素量を肥料品目ごとに算出し、肥料中窒素の月間出荷量として図8に示した。窒素供給量には年間に春期（2～3月）と夏期（8～9月）の

2つのピークがある。集水域への窒素供給も同様のパターンがあるものと考えられる。畑地への施肥後、この肥料中窒素の一部は降雨の浸透に伴って地下水中に混入し、湧水にあらわれるものと推定する。湧水にあらわれた窒素成分の形態は、ほとんど硝酸態窒素であった。関東ローム通過後の窒素形態については、島津ほか（2000）、金子ほ

図7 湧水集水域内の土地利用

Fig. 7 Map of land use in the catchment area of the spring

図8 JA北部営農センター（鶴ヶ島市）における肥料中窒素の月間供給量

Fig. 8 Amount of nitrogen contained in the fertilizer shipped from the Northern Agricultural Center of JA, Tsurugashima City

6.2 湧水量・水質モデルの構成

八幡神社湧水における湧水量、硝酸態窒素濃度と降雨量ならびに肥料との関係を図9に示す地下水タンクモデルにより検討する。このモデルは湧水集水域の地下水部のみを対象とするものであり、肥料窒素補給部と連なるA系統（A₁、A₂）のタンクと雨水浸透だけを考えるB系統（B₁、B₂）のタンク、ならびにA、B両系統からの流出が合するタンクCからなる。ここに、A系統のタンクは畑地への浸透、B系統のタンクは畑地以外の土地への浸透を表すが、後者の土地利用の中で雨水浸透のしやすい緑地の面積が畑地とほぼ同じであることを重視して、両系統の流出パラメータは同じとした。第1段と第2段のタンクから側方への流出は湧水以外の地下水流出であり、タンクCのNo.9、10流出孔からの流出が湧水に当たるとしている。No.11流出孔は深部への地下水供給孔である。各タンクの流出パラメータはタンクCからの流出量が湧水湧水量実測値に適合するよう調整

か（2002）も同様の報告をしているように、亜硝酸態ならびにアンモニア態窒素の存在は硝酸態窒素に比べて無視できるほど少量であった。

し決定した。

このモデルにおいて特徴とする肥料窒素補給部の内容を図10に図示する。肥料窒素補給部は地表から地下水面までの間を、地表近辺の表層ゾーン

図9 地下水タンクモデル
Fig. 9 Groundwater tank model

図10 雨水浸透過程における窒素成分の減少モデル
N：土中の窒素量を示す
Fig.10 Nitrogen decrease model on the process of rain infiltration.
N in the figure shows the amount of nitrogen

とその下の下部ゾーンとに2区分した上で、それぞれのゾーンに存在する窒素成分は経日的に逐次減少していくと仮定する。表層ゾーンは、飽和度が小さく、耕作土壌を含んだ肥料成分を保持するゾーンである。下部ゾーンは、飽和度が大きく、肥料成分が雨水浸透に伴って下方に移動するゾーンと考える。

施肥肥料中の窒素成分は表層ゾーン中で、まず作物に吸収利用されて減少する。さらに、不飽和であっても金子ほか (2002) が報告しているように、脱窒によって失われることも考えられる。肥料成分としての窒素が、表層ゾーン中で消失する実際の経過は不明であるが、畑作物に対する施肥が年サイクルで行われることを考慮して、モデルにおいては365日で消失すると仮定し、施肥日以降、直線関係的に減少していくものとする。図8の月間窒素出荷量が需要地域に全量投入されるものとして、需要地域内農地の表層ゾーン中における吸収、減少後の残留窒素量を日単位で求めると図11のようになる。八幡神社湧水集水域の表層ゾーン中に残留する窒素量はこの残留日単位量に比例すると考えられ、降雨があれば硝酸態窒素として下式により降雨浸透量に応じて下部ゾーンに輸送されるものと仮定した。

$$N = rf \times P \times F$$

ここに、 N ：窒素輸送量 (kg)、 P ：降雨浸透量 (mm)、 F ：表層ゾーン中の窒素量 (kg)、 rf ：比例係数 である。

比例係数 rf は、肥料需要地域面積に対する集水

図11 表層ゾーン中の推定残留窒素日量
Fig.11 Estimated residual amount of nitrogen in the surface soil zone

域内畑地面積の割合、肥料中窒素の硝化作用、硝酸態窒素の土中での移動のしやすさなどの要素を一括して含んだ係数であり、ここでは $rf = 2 \times 10^{-5}$ として、湧水中窒素濃度と対応させた。

下部ゾーン中の容水量は一定で飽和時の液相量、すなわち飽和容水量に相当すると考える。本地域の代表サンプルとして採取した不攪乱関東ローム試料より得られた液相率は75.4%であったので、飽和容水量は地表から地下水面に至る平均土層厚さ2.7mの半ばまでが飽和しているときの容水量と考えて、液相率を乗じて1000mmと仮定する。容水量を一定としたので、上部の表層ゾーンから降下してきた浸透水が加わると、下部ゾーンの底部から同容量の水が押し出されて地下水に移行することになる。図9のモデルでは、この下部ゾーン中の窒素成分が古い時期に取り込まれたものから順番に、押し出し水量に応じてA系統のタンクに投入される。

以上より、下部ゾーン中の全窒素量 TN と容水量 TP は；

$$TN = \sum_{k=1}^n N_k \quad TP = \sum_{k=1}^n P_k = 1000\text{mm}$$

k : 下部ゾーン中の順番で、 $k = 1$ が直近の降雨に対応。

である。下部ゾーンから地下水への窒素輸送量 WN は、新規の降雨浸透量 P_0 と下部ゾーン中最古

の降雨浸透量 P_n との大小関係により以下のようにになる。

$$P_0 < P_n \quad WN = \frac{P_0}{P_n} \cdot N_n$$

$$P_0 = P_n \quad WN = N_n$$

$$P_0 > P_n \quad WN = N_n + N_{n-1} + \dots$$

小川ほか (2000) は地下水面直上部でも脱窒により硝酸態窒素が除去されると報告している。このことを考慮して、下部ゾーンに新規に加わった浸透水が、さらに浸透水が加わるにつれて下方に移動する間、および浸透がなく滞留している間にも、下部ゾーン中の窒素成分は脱窒などによって減少していくものとする。この場合も窒素成分は表層ゾーン中の場合と同じく365日で消失すると仮定した。しかし、実際には上方から窒素成分が供給されるので、下部ゾーン中の窒素成分が消失することはない。

下部ゾーンから地下水中に移行した窒素成分は、以後はタンクモデルによる地下水の動きに従い、流動途中で吸収、減少することなく湧水にもたらされるものと仮定した。以上のモデルから得られた湧水量と窒素量から湧水中の硝酸態窒素濃度が求められる。

6.3 シミュレーション結果

八幡神社湧水の湧出量と硝酸態窒素濃度に対する計算結果を実測結果とともに図12、図13にそれ

図12 計算湧出量と実測湧出量の比較

Fig.12 Comparison of the observed flow rate with calculated results

図13 計算による硝酸態窒素濃度と実測濃度の比較

Fig.13 Comparison of the observed nitrogen-nitrate concentration with calculated results

ぞれ示す。計算湧出量は実測湧出量にみられる細かい変動にはあまり追従していないものの、総じて増減の傾向をよくあらわしている。

湧水の硝酸態窒素濃度の計算結果は、計算に際して確定困難な仮定条件を多く設定したので、実測濃度との対応は良好とは言いがたい。しかしながら、夏から秋にかけて濃度が増加するという年間を通じての特徴は示されている。春期は図8で示したように畑地への施肥が年間で最も多い時期であるにも関わらず、湧水中窒素量は夏期ほどには多くない。春期には降雨が少ないので窒素成分が地下水の中に入りにくいことが原因と考えられる。一方、夏から秋にかけての年間でもっとも降雨の多い時期には、地中に蓄積していた窒素成分が雨水の浸透に伴って押し出されて、地下水中に加わり、湧水中の濃度も増加する。本地域の南西に位置し類似の土地条件を持つ金子台（狹山市、入間市を中心とする地域）において、田瀬（2002）も同様のメカニズムを示唆している。さらに、この時期には地下水位変動が大きく、しかも頻繁であることから上昇した地下水が直接土中の窒素成分を取り込むことによる効果が相当に大きいと考えられる。

7. おわりに

湧水が貴重な地域環境として意識されてきている現在、湧水量や水質は湧水後背地の環境条件を反映するものであることを意識する必要がある。本文はこのような立場から、一湧水を例として湧水水質が後背地のどのような条件と対応するかということに注目した。対象地域は地下水位が浅く、土地利用などの地表条件が地下水に影響しやすい状況にあった。湧水中の硝酸態窒素濃度、電気伝導度、pHは観測した2年間において、それぞれ両年同様の年間変化パターンを示した。特に、硝酸態窒素濃度に注目した場合、年間変化は畑地を主とする土地利用とそこでの施肥の実態、降雨量とそれに伴う地下水位の変動という地域環境条件と密接な関わりがあることをタンクモデルによるシミュレーションにより示すことができた。これらのことは今後、気象条件や人為的影響も含めて地域環境が変化していくときに湧水の水量や水質をどう保全していくかということを考える際の手がかりになると考える。

参考文献

小川吉雄、加藤英孝、陽 捷之（2000）：地下水面直上部における降下浸透水中の硝酸態窒素の消長と土壌

- の脱窒能. 日本土壤肥料学雑誌、**71**(4)、494-501.
- 金子文宣、大塚英一、山本幸洋、大谷邦洋、犬伏和之、
載 偉 (2002) : パンライシメータ法による関東
ローム堆積露地畑における土壌水および硝酸態窒素
の浸透実態. 日本土壤肥料学雑誌、**73**(5)、501-507.
- 国分邦紀、中山俊雄、中島庸一 (2000) : 練馬区土支田・
大泉地区の地下水と湧水. 平成12年度都土木研年
報、203-212.
- 国分邦紀、中山俊雄、中島庸一 (2003) : 板橋区赤塚溜
池周辺の地下水と湧水. 平成15年度都土木研年報、
171-178.
- 島津暉之、和波一夫 (2000) : 雨水地下浸透の評価に関
する研究 (その1). 平成12年度都環境科学研年報、
135-143.
- 田瀬則雄 (2002) : 土壌層の持つ土地利用メモリーと地
中水との相互作用の解明. 科研費補助金研究成果報
告書、77p.
- 田中芳則・土屋 悟 (1989) : 台地部深層地下水におけ
る塩素イオン濃度の規制要因. 地下水会誌、**31** (1)、
1-12.
- 鶴ヶ島町史編さん室 (編) (1990) : 『鶴ヶ島の地質』鶴ヶ
島町、99p.
- (受付 : 2005年11月11日、受理 : 2006年3月25日)