

印旛沼流入河川における地下水起源の窒素負荷に関する検討

STUDY ON NITROGEN LOAD OF GROUNDWATER INTO A INFLUENT RIVER OF LAKE INBA-NUMA

北川正佳¹・二瓶泰雄²・原田渉¹

Masayoshi KITAGAWA, Yasuo NIHEI and Wataru HARADA

¹学生員 学 (工) 東京理科大学大学院 理工学研究科土木工学専攻修士課程
(〒278-8510 千葉県野田市山崎2641)

²正会員 博 (工) 東京理科大学准教授 理工学部土木工学科 (同上)

Nitrogen contamination in rural rivers may be caused due to pollutant load from plowed fields with excessive fertilization through groundwater. However there has been little information for discharge and pollutant load of groundwater into rivers. In the present study, we conducted field measurements to clarify the discharge and nitrogen flux of groundwater into the Takasakigawa River, flowing into Lake Inba-numa, with nitrogen contamination. The results indicated that: 1) nitrate concentration of groundwater was mostly higher than that of river water, and 2) discharge and nitrate flux of groundwater into the river were 73~92%, and 81~95%, respectively in the observed reach with 1.4 km in length. The source of the groundwater flowing into the Takasakigawa River were discussed using water quality data of groundwater in its watershed.

Key Words: pollutant load, groundwater, nitrogen, Lake Inba-numa, plowed field

1. 序論

農村地帯を流れる河川の流域では、畑地や水田における過剰な施肥による地下水や河川水の窒素汚染が問題視されると共に、農村河川が流入する湖沼などにおける富栄養化問題の一因となっている¹⁾。これらの農村河川流域では、畑地における浸透能が一般に高く、表面流出量よりも地下浸透量が卓越し、結果として、流域から河川への流出メカニズムとしては地下水の影響が支配的となる²⁾。地下水の流動や水質は、河川水と比べて直接モニタリングし得る項目が限定されるため不明な点が多い。そのため、流域全体における農地(畑地・水田)~湧水・地下水~河川に至る水・物質循環機構を包括的にモニタリングする必要がある。

千葉県印旛沼は、長年富栄養化問題が解決されない湖沼であり、現況の水質環境の経年変化は横ばいか悪化傾向にある³⁾。その一因として、上述した農地由来の窒素汚染がいくつかの河川で深刻化していることが挙げられ、この窒素汚染の改善が印旛沼の水質改善のキーとなっている⁴⁾。これまで印旛沼の窒素汚染を含む汚濁負荷に関

する研究として、土地利用と河川水質の関係⁴⁾、流入河川における窒素汚染状況と畑地との関連性^{5)~7)}、GISや流域水・物質循環モデルによる土地利用特性と汚濁負荷の関係^{8)・9)}、湧水の水質環境の経年変化¹⁰⁾などが検討されている。また、窒素汚染が深刻な高崎川における地下水経路の窒素負荷原単位も算出されている¹¹⁾。これらより、特に流入河川における窒素汚染のソースは畑地であり^{5)~7)}、その流入過程として地下水経路が主であることが示された。しかしながら、実際に、河川の流量や水質に対して地下水影響がどの程度あるかは定量的には不明である。また、窒素汚染河川(高崎川)の上流部では三面コンクリート護岸が施され、地下水が河川に直接流入し得るのか、という疑問も存在する。

本研究では、窒素汚染が進む高崎川上流部において、河川への地下水の直接流入量や窒素負荷量を現地計測し、高崎川における地下水流入過程やその窒素濃度への影響、それらの季節変動特性を明らかにする。ここでは、トレーサ試験など直接的な地下水流動調査を行わずに、ある縦断区間内において、上下流端を含むいくつかの断面の河川流量・水質やその区間に横流入する排水の流量・水

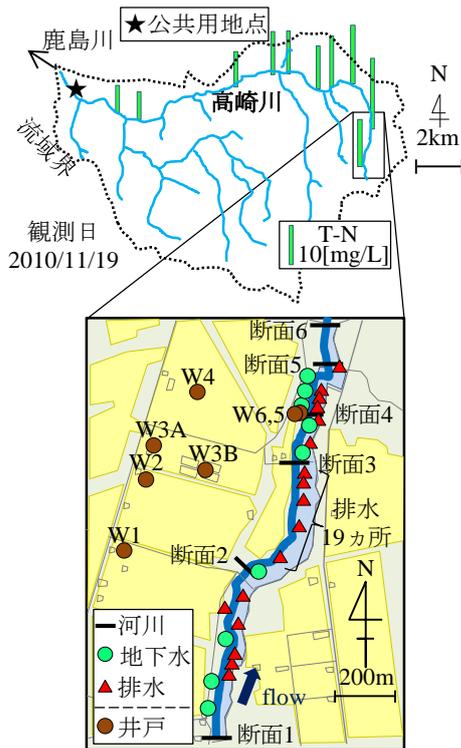


図-1 観測サイトと観測地点

質を計測し、水・物質収支の残差から地下水直接流入量や地下水濃度を算定する。これらの観測と共に、河川脇や集水域における地下水の水質データも取得し、河川水や流入する地下水データと比較・検討を行う。なお、ここでの地下水とは、河道部に直接湧出するものや井戸から採取されたものとする。

2. 研究方法

(1) 観測サイト

観測サイトである高崎川は、図-1 に示すように、印旛沼へ流入する河川のうち最も大きい鹿島川に合流する全長 6.1km、流域面積 85.3km²の河川である。流域の土地利用特性としては、山林 23%、水田 8%、畑 33%、市街地 34%、その他 2%であり、特に上流部では畑や水田が集中する農村河川である。高崎川における水質環境調査を行ったところ (2010/8/12)、全窒素 T-N は多くの地点において 10mg/L を越えており、最大で 18mg/L と非常に高い値が観測された (図-1 上図)。窒素レベルが高い上流部は、三面コンクリート張りで整備されているが、図-2 に示すように、所々にコンクリート間の隙間や割れ目が存在し、それらから地下水が河川へ流入している可能性が高い。また、護岸に設けられた排水管からの流入 (以下、単に排水と呼ぶ) も多数存在している。

観測サイトは高崎川上流部の断面 1 から 6 における

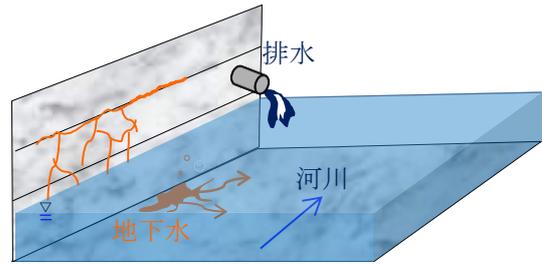


図-2 河川への地下水・排水の流入状況

表-1 観測地点数

	2010		2011				2012	
	9/13	11/19	1/12	5/25	8/1	9/8	1/13	7/25
河川	2	6	6	6	6	6	6	6
排水	7	31	31	13	7	0	1	1
地下水	0	9	9	9	9	0	9	9

1.4km 区間を対象とする。ここでは、①1.4km 区間における水・物質収支観測、②集水域における地下水の水質観測、という観測を行った。以下では、各観測の概要を示す。

(2) 水・物質収支観測の概要

水・物質収支観測としては、図-1 に示すように、河川 6 断面 (上流から断面 1~6) 及びこの上下流端の間に流入する地下水と排水に関して、流量計測 (地下水を除く) と採水を行った。流量計測では、河川では電磁流速計 (LP-30、榊ケネック製) を、排水ではバケツとストップウォッチを各々用いた。地下水の流入量 Q_G の算出に当たり、観測を行った河川断面 i と $i+1$ 間 ($i=1\sim5$) における流入量 Q_{Gi} は、次の水収支式から求められる。

$$Q_{Gi} = (Q_{Ri+1} - Q_{Ri}) - \sum Q_S \quad (1)$$

ここで、 Q_{Ri} と Q_{Ri+1} は断面 i 、 $i+1$ における河川流量であり、 $\sum Q_S$ はこの断面間における全ての排水流量の総和である。なお、この観測は平水時に行われ、観測中の河川水位の変化が無いことを確認している。次に、各地点の採水に関しては、河川と排水ではバケツにより行った。一方、地下水に関しては、前述したように、コンクリート護岸の隙間や割れ目から地下水流入が生じていることが確認されたため、護岸割れ目に土壤水採取器 (ミズツール (畑地用)、大起理化学工業(株)製) を差し込み実施した。この地下水採取を主に 9 地点で行うが、代表性に疑問があるため、地下水流量と同じく、次の物質収支式から、断面 i 、 $i+1$ 間における地下水の平均水質濃度 C_{Ui} を算出する。

$$C_{Gi} = \frac{(Q_{Ri+1}C_{Ri+1} - Q_{Ri}C_{Ri}) - \sum(Q_S C_S)}{Q_{Gi}} \quad (2)$$

ここで、 C_{Ri} は断面 i の河川水質濃度、 C_S は排水の水質濃度である。

観測日は、2010/9/13、11/19、2011/1/12、5/25、8/1、9/8、2012/1/13、7/25 であり、各観測日の観測地点数を表-1 に示す。各観測日における河川全断面での年平均水深は 12cm であった。排水に関しては、観測開始当初の 2010/11/19 や 2011/1/12 では河川に流入する全排水管を対象としていたが、流量・水質濃度への影響が見られない排水も多数見られたことから、その後の調査では、流量の多い排水のみを対象とした。なお、地下水については、護岸割れ目から地下水が湧出している箇所にて採水を行った（計 9 地点）。

採水サンプルについて、まず、硝酸イオンメーター（大起理工業製）と ORP メーター（RM-30P、東亜DKK 製）により、 $\text{NO}_3\text{-N}$ と酸化還元電位をそれぞれ現場計測した。その後、採水サンプルを実験室に持ち帰り、オートアナライザー（swAAt、BLTEC 製）により窒素（ $\text{NO}_2+\text{NO}_3\text{-N}$ ）を、イオンクロマトグラフ法（SIL-10A、（株）島津製作所製）により Na^+ 、 K^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 Cl^- 、 NO_3^- 、 SO_4^{2-} を分析した。また pH4.8 アルカリ度滴定法により HCO_3^- を求めた。なお、イオンクロマトグラフ法と pH4.8 アルカリ度滴定法については、2012/7/25 のサンプル水のみ分析した。

(3) 集水域の地下水水質観測

河川に流入する地下水の性質を把握するために、高崎川流域における地下水の採水を行った。集水域の地下水観測位置としては、まず、断面4の左岸側に観測井2ヶ所（河川から0.8m、24m、井戸深さは地表面から2~4m）を掘り、そこで採水を行った（井戸から採取した地下水を河川に流入する地下水と区別するために、「井戸地下水」と称す）。また、図-1に示す集水域における飲料用井戸4箇所（深さ10~60m）においても採水した。これらの井戸は台地の畑地に位置している。分析項目と方法は、前述と同じものとする。観測日は全て2012/7/25である。

3. 結果と考察

(1) 地下水水質濃度の実測値と推定値の比較

まず、河床において採取された地下水水質の代表性について検証するために、地下水の水質濃度（硝酸態窒素と亜硝酸態窒素濃度の和 $\text{NO}_2+\text{NO}_3\text{-N}$ ）に関する実測値と推定値を比較したものを図-3 に示す。ここでの推定値は式

(2) により得られたものであり、その平均値と標準偏差を図示する。また、図中には、地下水観測を行った 6 回の観測結果に対して、各観測における平均値と標準偏差

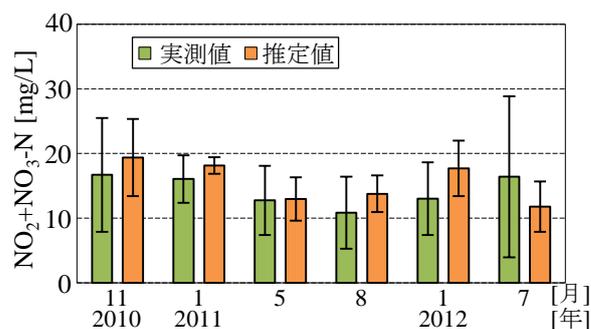


図-3 地下水の $\text{NO}_2+\text{NO}_3\text{-N}$ の実測値と推定値の比較

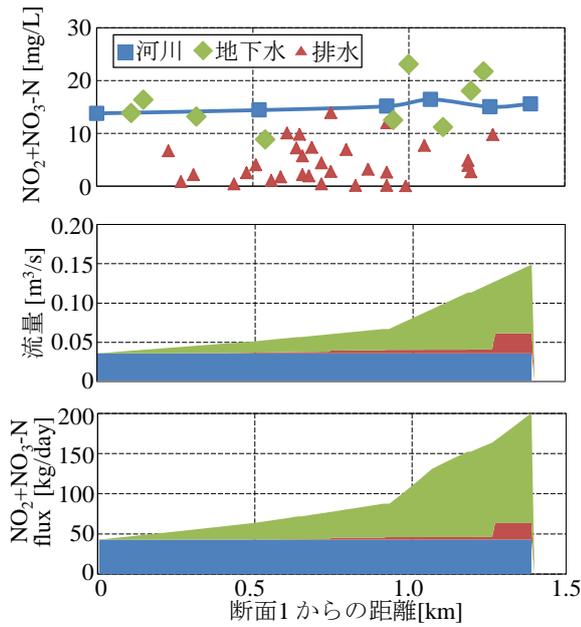
を表示している。これを見ると、 $\text{NO}_2+\text{NO}_3\text{-N}$ に関する実測データの平均値は、季節的に変化し、概ね 11~17mg/L となり、一般的な地下水の環境基準 (=10mg/L) を大きく上回っている。それに対して、 $\text{NO}_2+\text{NO}_3\text{-N}$ の推定平均値は、12~19mg/L となっている。各観測日における $\text{NO}_2+\text{NO}_3\text{-N}$ の実測値と推定値を比べると、観測日により両者の差が大きいつきが見られるものの、概ね、両者の差は標準偏差の範囲内に収まっていることが分かる。これより、地下水の実測値は、概ね空間的な代表性があることが確認されると共に、河川に流入する地下水の $\text{NO}_2+\text{NO}_3\text{-N}$ が極めて高いことが明らかとなった。

(2) 流量・窒素濃度・負荷量の縦断変化

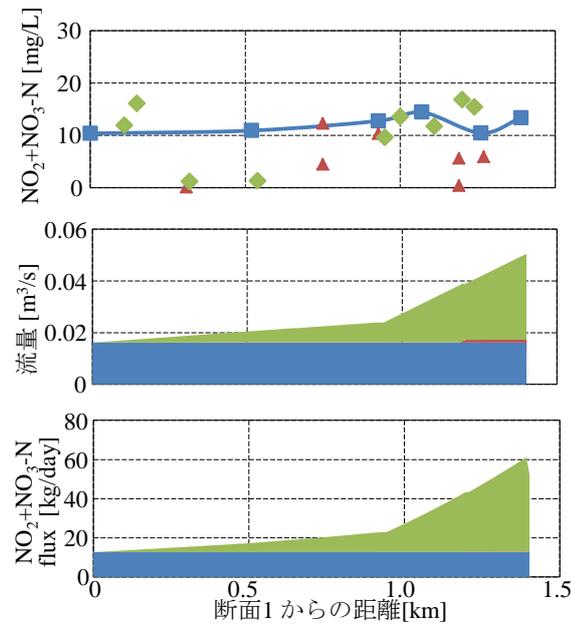
高崎川上流部における流況及び水質環境の縦断方向変化を把握するために、観測区間における $\text{NO}_2+\text{NO}_3\text{-N}$ 、流量及びその積である負荷量の縦断変化を図-4 に示す。ここでは、冬季（2011/1/12）と夏季（2011/8/1）の結果を例示し、水質データは実測値を表示している。また、流量や負荷量に関しては、各河川横断面での流量や負荷量を河川上流部（断面 1 の値）と排水、地下水に分割し、地下水成分は、水・物質収支から算定された結果を用いている。

まず、冬季の結果に着目すると、河川流量は縦断方向に緩やかに増加し、断面 1 から 0.9km 地点を越えると急激に増加している。この流量増加には、排水よりも地下水が大きく寄与している。また、 $\text{NO}_2+\text{NO}_3\text{-N}$ 濃度については、河川水は上流から下流にかけて緩やかに増加すると共に、濃度レベルとしては、地下水が最も高くなっており、河川水の $\text{NO}_2+\text{NO}_3\text{-N}$ 濃度増加に地下水が大きく影響している。また、 $\text{NO}_2+\text{NO}_3\text{-N}$ 負荷量については、流量や $\text{NO}_2+\text{NO}_3\text{-N}$ 濃度の結果を反映し、断面 1 から 0.9km 地点を越えて急激に負荷量が増加している。それに対して、地下水の寄与が大きくなり、排水の寄与は相対的に小さい。

一方、夏季の結果に関しては、流量や $\text{NO}_2+\text{NO}_3\text{-N}$ 濃度は冬季よりも全体的に小さいものの、河川水や地下水、排水の相対的な大小関係は冬季とほぼ同じ傾向が見られ



(a) 冬季 (2011/1/12)



(b) 夏季 (2011/8/1)

図4 硝酸態・亜硝酸態窒素, 流量, 負荷量の縦断変化

る。また、地下水の $\text{NO}_2+\text{NO}_3\text{-N}$ 濃度の縦断変化パターンとしては、上流部や下流部の一部で高濃度となっており、これらも概ね夏季と類似したパターンとなっている。

(3) 流量・負荷量の縦断変化に対する地下水の寄与率

前述したように、観測サイトでは、河川の縦断方向に流量や $\text{NO}_2+\text{NO}_3\text{-N}$ 負荷量が増加し、それに対して、地下水流入の寄与が大きいことが示された。このことを定量的に検討するために、全観測区間における $\text{NO}_2+\text{NO}_3\text{-N}$ 、流量、水質負荷量を図-5に示す。ここでは、2010年11月か

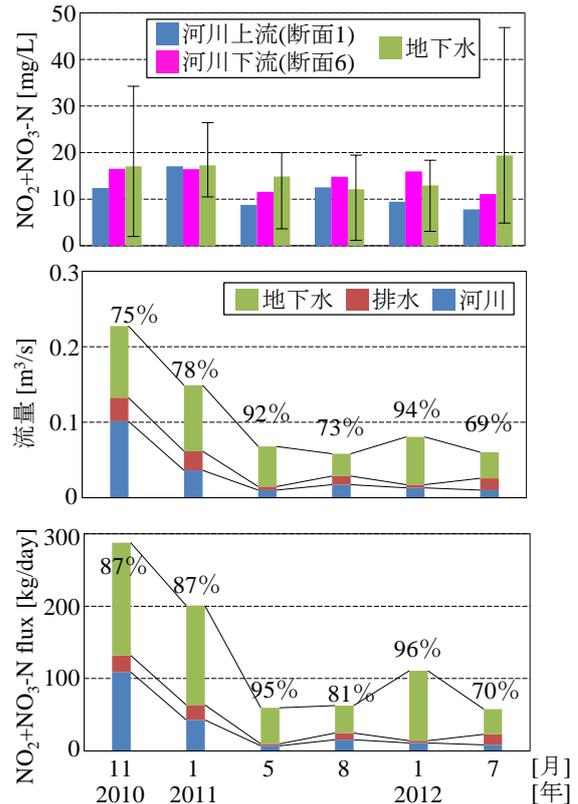


図5 水質濃度(上)・流量(中)・負荷量(下)の季節変化(下図の中の数値は地下水の寄与率を示す)

ら2012年7月までの結果が示されている。同図(上)には、河川上流(断面1)と下流(断面6, 共に平均値のみ)、地下水(平均値, 最大・最小値)の値を表示している。同図(中), (下)には流量及び $\text{NO}_2+\text{NO}_3\text{-N}$ 負荷量について、河川下流部(断面6)の結果を河川(断面1の値)と排水, 地下水に分けて表示しており、地下水については河川上・下流間の水・物質収支より算出されたものを用いる。また、流量と負荷量の図には、対象河川区間における流量・負荷量増加分(=排水+地下水)に占める地下水の割合が表示されている。図-5より、 $\text{NO}_2+\text{NO}_3\text{-N}$ 濃度に着目すると、2011年1月を除き、全て上流よりも下流の方が大きくなっている。また、地下水の $\text{NO}_2+\text{NO}_3\text{-N}$ は河川の値よりも概ね大きくなっており、対象河川では、地下水による窒素濃度増加が顕著である。なお、地下水の $\text{NO}_2+\text{NO}_3\text{-N}$ の平均値が河川下流断面の値を下回る時が散見される(2011/8, 2012/1)。この時には地下水の $\text{NO}_2+\text{NO}_3\text{-N}$ の推定値が当然ながら実測値を上回るが(図-3)、前述したように標準偏差の範囲で推定値・実測値の差は収まっているため、観測誤差の範囲であるものと思われる。

流量について、河川上流から河川下流までの増加量に対する地下水の割合は、秋季・冬季・春季・夏季においてそれぞれ75%・78%・92%・73%であり、河川流量に占める地下水の割合が年間を通じて極めて顕著であるこ

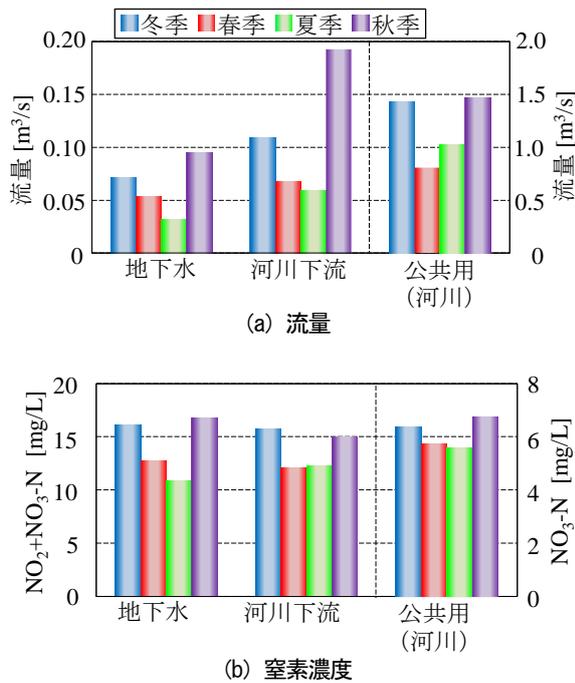


図-6 流量と窒素濃度の季節変化

とが分かる。同様に、 $\text{NO}_2+\text{NO}_3\text{-N}$ 負荷量に関する河川増加量に対する地下水の寄与率は秋季・冬季・春季・夏季の順に、87%・87%・95%・81%となっている。このように、高崎川は三面コンクリート張りで覆われているが、その割れ目や隙間から地下水が大量にしみだし、どの時期においても窒素汚染のソースとなっている。

(4) 流量と窒素濃度の季節変動特性

このように地下水影響が顕著である本サイトにおける流量や水質環境の季節変動特性を把握するために、流量・窒素濃度の季節変化を図-6に示す。ここでは、前述した地下水と河川下流(断面6)のデータに加え、高崎川下流部(図-1中の★印)における公共用水質データ(2005~2010年までの平均値)の結果を表示している。なお、窒素濃度としては、公共用データのみ $\text{NO}_3\text{-N}$ とし、その他は $\text{NO}_2+\text{NO}_3\text{-N}$ としている。

流量に関しては、秋季・冬季に大きく、春季・夏季に小さいのは、全てに共通し、特に、公共用データを除く2項目で顕著である。同エリアにおける地下水位変動を見ると(図省略)、農業用取水の影響により、夏季に最小となり、秋季・冬季に高くなり、その結果として、地下水流入量や河川流量の季節変化が形成されているものと考えられる。また、窒素濃度に関しては、地下水や河川データは、流量と同じく、夏季に小さく、冬季に高い結果となっており、高橋・二瓶⁹⁾と同じ結果となっている。

(5) 河川に流入する地下水の起源の検討

高崎川上流部における窒素汚染の要因である地下水の

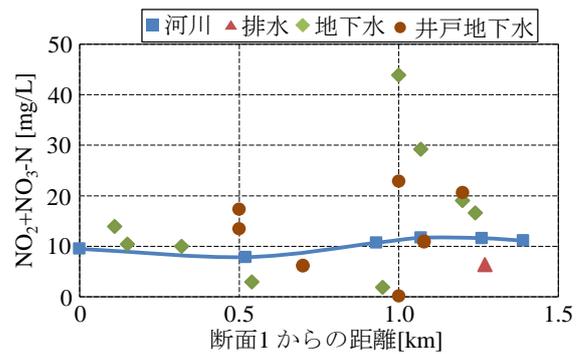


図-7 河川水、排水、地下水、井戸地下水の $\text{NO}_2+\text{NO}_3\text{-N}$ に関する縦断変化(2012/7/25)

起源を検討するために、集水域における井戸地下水の水質環境と河川に流入する地下水環境を比較する。まず、井戸地下水の水質環境の基本的な特徴を確認するために、図-4と同じく河川水、排水、地下水の水質濃度の縦断変化結果に、井戸地下水のデータを加えたものを図-7に示す。ここでは、 $\text{NO}_2+\text{NO}_3\text{-N}$ を対象としており、同時観測が行われた2012/7/25の結果が表示されている。また、井戸地下水の観測点における断面1からの縦断距離は、各地点から河川に垂直線を引いて算出している。これより、 $\text{NO}_2+\text{NO}_3\text{-N}$ に関しては、前述したように河川上流側や下流側の一部の地点で地下水濃度が河川水よりも高くなっており、この観測日では、地下水の $\text{NO}_2+\text{NO}_3\text{-N}$ は最大で40mg/Lを越えている。それに対して、井戸地下水濃度の縦断変化パターンは、河川に流入する地下水と類似しているようにも見られる。このような河川に流入する地下水と井戸地下水の類似度を比較・検討するために、これら地下水と河川水、井戸地下水の主要イオン8成分(Na^+ , K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , Cl^- , HCO_3^- , NO_3^- , SO_4^{2-})のクラスター分析を行った結果を図-8に示す。ここでは、比較のために、河川水の結果も加えて分析している(2012/7/25の結果)。図中における井戸地下水のデータの表記としては、地点番号と井戸深さ(例えば、W1-60は、W1地点で井戸深さは60mである)としている。この結果より、上記の水質データ群は、河川水を除くと4つのグループに分けることができる。すなわち、①Stn.W1-30&60, W5, W6とStn.G1, G8, G9, ②Stn.W3A-10, W4-60とStn.G7, ③Stn.W2-30&60, W3B-30,とStn.G2~6である。これらの結果より、地下水の流動方向を模式的にまとめると図-8中の矢印のようになり、河床に流入する地下水が集水域のどのエリアから流れてきたものなのかを概ね把握することができた。

4. 結論

本研究で得られた主な結論は以下のとおりである。

- (1) 印旛沼流入河川・高崎川上流部にて、水・物質収

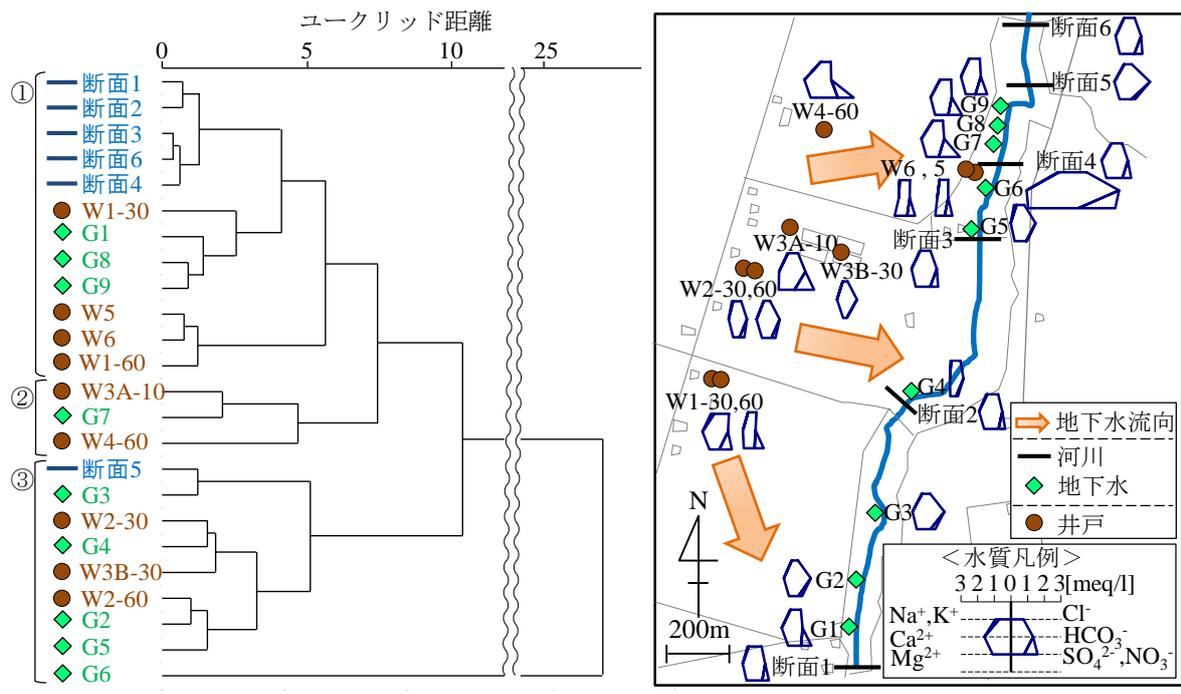


図-8 主要8イオンによるクラスター分析結果と地下水流向の模式図 (2012/7/25)

支観測を行った結果、NO₂+NO₃-Nは河川上流部よりも下流部の方が大きかった。また、河川水のNO₂+NO₃-Nと比べて、全般に排水は小さく地下水は大きく、河川における窒素濃度増加に地下水が関与していることが示された。

(2) 対象河川区間における流量・負荷量の増加量に対する地下水の寄与は、流量に関しては73~92%、負荷量に関しては81~95%となっており、地下水影響が極めて大きいこと、その影響は負荷量により強く現れていることが示された。また、三面コンクリート張りで護岸整備された高崎川においても、護岸の割れ目や隙間から地下水が大量に流入していることが明らかであり、地下水が高崎川の窒素汚染のソースになっていることが示された。

(3) 河川に流入する地下水の起源を調べるために、集水域の井戸における地下水の水質環境を調べ、それらの結果のクラスター分析を行った。それらの結果に基づいて、河川に流入する地下水の起源を推定することができた。それらの結果は、今後の窒素汚染対策に対する重要な指針となり得るものと考えられる。

謝辞：現地観測実施の際には、千葉県富里市富里土地改良区にご協力を頂いた。現地観測及びデータ解析に対して、東京理科大学理工学部土木工学科水理研究室学生諸氏には多大なる御助力を頂いた。また、主要イオン分析に当たり、千葉大学園芸学部緑地環境学科緑地工学研究室唐常源教授には多大なるご協力を頂いた。ここに記して謝意を表す。

参考文献

- 1) 江川太郎：河川工学入門，山海堂，pp.1-212，1997.
- 2) 日本土壌肥科学会監修 長谷川周一，波多野隆介，岡崎正規編：環境負荷を予測するーモニタリングからモデリングへー，博友社，pp.1-295，2002.
- 3) 千葉県：印旛沼流域水循環健全化計画会議 第17回委員会資料，2010.
- 4) 田林輔，山室真澄：都市化地域における土地利用と河川水質の関係。一 下総台地の坂川流域における事例一，水工学論文集，Vol.52，pp.1129-1134，2008.
- 5) 赤松良久，二瓶泰雄，長谷川定，林薫，湯浅岳史，上原浩，小倉久子：印旛沼流入河川における窒素汚染の実態とその要因，河川技術論文集，Vol.16，pp.311-316，2010.
- 6) 郡佑輔，黄琳，近藤昭彦：千葉県下総台地における表流水の硝酸態窒素濃度の時空間分布，日本水文学会学術大会講演要旨集，Vol.25，pp.109-112，2010.
- 7) 森本恭行，河野英一，笹田勝寛：下総台地の台地畑における窒素収支について，農業土木学会全国大会講演要旨集，pp.802-803，2002.
- 8) 湯浅岳史，吉田正彦，上原浩，佐々木亨：GISを用いた汚濁負荷量の算定と流域浄化機能の評価，日本水環境学会年次講演会，Vol.39，pp.94，2005.
- 9) 上原浩，湯浅岳史，林薫，小倉久子：流域水物質循環モデルによる印旛沼流域の水・物質収支の把握，第12回日本水環境学会シンポジウム，2009.
- 10) 二瓶泰雄，真茅良平，堀田和弘，湯浅岳史：印旛沼流域における湧水の栄養塩・COD環境の把握，水工学論文集，Vol.54，pp.1351-1356，2010.
- 11) 高橋友陽，二瓶泰雄：河川水質縦断変化データに基づく平水時浸透流域平均原単位の推定，土木学会論文集B1(水工学)，Vol.68，No.4，pp.643-648，2012.

(2012.9.30 受付)