

(5) 東京都区部の地下水窒素汚染の現状と汚染源の推定

黒田啓介^{1*}・福士哲雄¹・滝沢智¹・愛知正温²・林武司³・徳永朋祥²

¹東京大学大学院工学系研究科都市工学専攻 (〒113-8656 文京区本郷7-3-1)

²東京大学大学院新領域創成科学研究科 環境システム学専攻 (〒277-8561 千葉県柏市柏の葉5-1-5)

³秋田大学教育文化学部 (〒010-8502 秋田市手形学園町1-1)

* E-mail: k_kuroda@env.t.u-tokyo.ac.jp

地下水の窒素汚染は従来から日本の大都市部でも問題となっているが、被圧地下水の水位上昇問題の出現や、渇水時、震災時の代替水源としての地下水の見直し等を受け、今後は地下水の有効利用の可能性がますます高まっている。そこで東京都区部の地下水水質を調査した結果、不圧地下水、被圧地下水ともに窒素が10mg/Lを超える高濃度の地点が存在した。不圧地下水の窒素の形態は酸化還元状態に依存し、都区部西側の台地では硝酸性窒素が、都区部東側の低地ではアンモニア性窒素が卓越していた。土地利用と水収支から降水・水道漏水・施肥による窒素濃度を推定したところ、全体のおよそ6割の地点で実測値が推定値を上回っており、生活排水の漏れが寄与している可能性があった。

Key Words : land use, nitrogen pollution, sewer leakage, urban groundwater, water balance

1. 研究の背景と目的

地下水は、手軽に得られる安価で清浄な水として世界各地で長い間利用されてきた。都市部において、地下水は生活用水、産業用水あるいは融雪用水などとして低価格で良質な用水を供給し、都市の発達に貢献してきた。

東京においても、古くから地下水が市民生活によく利用されていた。高度成長期の地下水の過剰汲み上げは地盤沈下を招き、昭和45年頃から地下水揚水が規制された。その結果地下水位は低下から上昇に転じ、近年は東京駅や上野駅等の地下構造物の浮上防止などの対策が講じられた事例がある¹⁾。不圧地下水は、東京において水位は昭和44年から30年間はほぼ一定である²⁾が、地震時の地盤の液状化に深い関連があり、地下水位が地表から1m以浅であったところで液状化が非常に多いと指摘されている³⁾。一方で、最近では地下水を利用した専用水道が増加しており⁴⁾、不圧地下水・被圧地下水共に、災害

時生活用水・環境用水・修景用水・ヒートアイランド対策としての路面散水としての有効利用の可能性が見直されている。

今後ますます地下水の有効利用が進む可能性がある中で、地下水の現状を知り有効利用と保全について考えるためには、地下水水位と共に地下水水質を明らかにする必要がある。都市の地下水の汚染には、自然的汚染にはヒ素やフッ素が、人為的な汚染には窒素、重金属類や有機塩素化合物、油類の漏出などがあるが、最も一般的でしばしば問題となる汚染は窒素によるものである。本研究の目的は、これまで地下水の利用が限定的であり水質情報に乏しかった東京都区部の窒素汚染を把握し、汚染源を推定することである。

東京都区部の地形は東側の低地と西側の台地に大きく特徴付けられ、帯水層も異なっている。地下水質はこれらの地形、帯水層や土地利用等の条件により異なると考えられる。本研究では、東京都区部の

地下水窒素汚染の調査と、不圧地下水の窒素汚染について土地利用や水収支から汚染源の推定を行った。

2. 既存の知見

(1) 地下水の窒素汚染と国内の汚染状況

地下水中の窒素の形態は主にアンモニア性窒素、硝酸性窒素、及び亜硝酸性窒素である。アンモニア性窒素は塩素消毒の際に塩素投入量の大幅な増加を招く。硝酸性窒素は体内でヘモグロビンと結びついてメトヘモグロビン血症を発症させ、最悪では死に至るケースもある⁵⁾。

アンモニア性窒素は、酸化環境において硝化細菌により容易に亜硝酸や硝酸へと酸化される⁶⁾。硝酸イオンは粘土質との吸着性は低く、安定であるが還元的な環境になると脱窒菌による脱窒が起き、亜硝酸イオンを経て窒素分子になる⁶⁾。

わが国の地下水に係る環境基準では、窒素濃度の基準は硝酸性窒素および亜硝酸性窒素として10mg/L以下である⁷⁾。環境省の調査では、平成17年度の調査対象井戸の4.2%が環境基準を超過しており、他の項目に比べ超過率が高い⁸⁾。東京都の平成16年の調査では、東京都区部において最大22mg/Lの硝酸性窒素及び亜硝酸性窒素が検出された⁹⁾。

(2) 都市の地下水における窒素の汚染源

地下水中の窒素汚染は農地における施肥や家畜排水が主な原因であることが多い¹⁰⁾¹¹⁾が、農地の少ない都市部の地下水においてもしばしば高濃度の窒素が検出される。都市部の窒素は水道配水管からの漏水や、下水管きょからの下水の漏れ、浄化槽などのオンサイト廃水処理施設からの排水、家畜廃棄物、廃棄物埋め立て場からの浸出水、工業排水、大気降下物、都市における肥料の使用(家庭菜園など)、住宅の建築などが原因であると報告されている¹²⁾¹³⁾。特に都市部においては、下水管からの下水の漏れは地下水に大きなインパクトを与える。オーストリアで生活排水の下水管から地中への漏れが算定された事例では漏水率が1%未満であった¹⁴⁾。ドイツでは、

下水の漏れによりラストット市では80kgN/ha/年、ハノーヴァー市では30kgN/ha/年という大量のアンモニア性窒素が地下水に供給されていると算出された¹⁵⁾。また、平野部の地盤沈下地域では、海成粘土層の圧密によりアンモニア性窒素が上下の帯水層に排水される可能性があると報告されている¹⁶⁾。

一方、水道水中にも低濃度ながら硝酸性窒素が含まれており、漏水により地下水中に硝酸性窒素が供給される。東京都水道局の平成16年度の漏水率は全配水量の4.4%であった¹⁷⁾。漏水が発生する管路の97.1%は地下浅部に埋設されている給水管であり¹⁸⁾、漏水が水量の面で不圧地下水に寄与する割合は相当大きい。

3. 調査方法

東京都23区を対象に、防災井戸などの公共井及び浴場用井戸などの私有井の合計106井戸にて採水し、pH、DO、電気伝導度、アンモニア性窒素、硝酸性窒素、溶存態有機炭素、主要陰イオン、主要陽イオン、濁度、大腸菌、大腸菌群数等を測定した。また、井戸の所有者または管理者から深さ等の情報を得て、帯水層を把握した。106地点の内訳は、不圧地下水が51地点(うち湧水が3地点)、被圧地下水が55地点であった。図-1に採水地点と表層地質¹⁹⁾を示した。

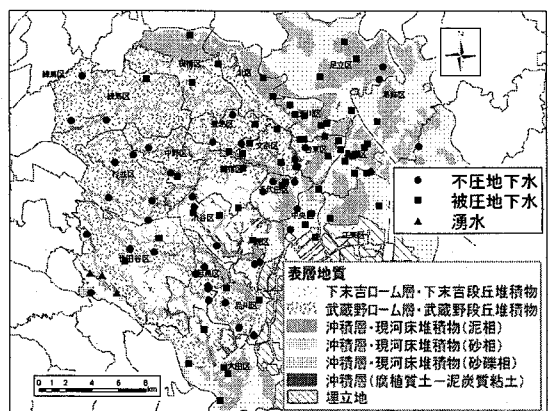


図-1 調査地点の分布と表層地質

4. 東京都区部地下水の窒素汚染状況と土地利用の関係

(1) 窒素濃度の分布

不圧地下水、被圧地下水のアンモニア性窒素、硝酸性窒素の分布をそれぞれ図2、図3に示す。

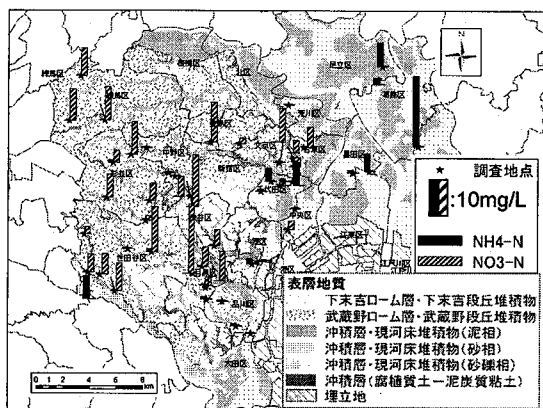


図-2 不圧地下水のアンモニア性窒素・硝酸性窒素濃度の分布

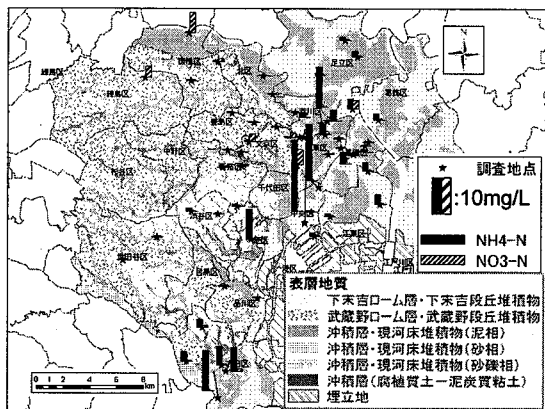


図-3 被圧地下水のアンモニア性窒素・硝酸性窒素濃度の分布

アンモニア性窒素と硝酸性窒素濃度を合計濃度が、硝酸性窒素の環境基準である 10mg/L を超えた地点は、不圧地下水において 10% (5/51 地点)、被圧地下水で 9% (4/55 地点) 存在した。これらの地点の地下水は有効利用上支障をきたす可能性がある。

(2) 不圧地下水の窒素濃度の分布傾向

不圧地下水では窒素の分布には傾向が見られ、東

側の低地にアンモニア性窒素、西側の台地に硝酸性窒素が多く分布していた。被圧地下水は、アンモニア性窒素は臨海部や東側の一部で検出され、硝酸性窒素はほとんど検出されなかった。

アンモニア性窒素と硝酸性窒素は同時に検出されず、ほとんどの地点でどちらか一方のみが検出された。図-4 に DO (溶存酸素) を横軸にとり、アンモニア性窒素と硝酸性窒素を縦軸にプロットして示す。DO が低い領域ではアンモニア性窒素が高濃度の地点が多く、DO が高い領域では硝酸性窒素が高濃度の地点が多かった。全窒素中の硝酸性窒素の割合は DO と正の相関 ($r=0.48$, $p<0.01$) があった。

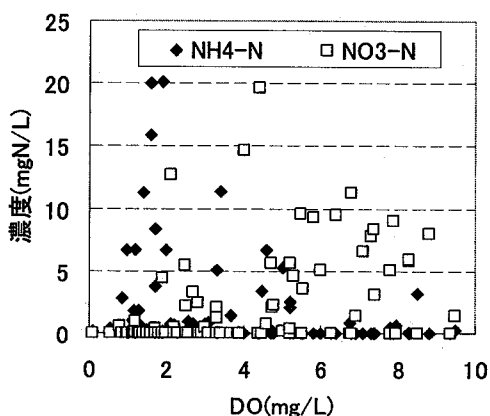


図-4 DO とアンモニア性窒素・硝酸性窒素濃度の分布

窒素の存在形態は地下水の酸化還元状態により異なっている。都区内西側の武蔵野台地側では、水はけがいため DO が高く、酸化的環境である。ここでは生活排水、肥料や土壌に由来するアンモニア性窒素は硝酸性窒素に酸化される。一方、都区内東側の低地側では、DO が低く還元的な環境であるため、水道の漏水や降水等に由来する硝酸性窒素は地下水中で脱窒されて窒素分子となり、生活排水、肥料や土壌由来のアンモニア性窒素のみが地下水中に存在すると考えられた。

5. 東京都区部不圧地下水の窒素濃度の推定

(1) 水収支の算出

不圧地下水について、地表の水収支を算出することと地下水涵養量を算出し、想定される窒素の負荷量から、各調査地点における窒素の濃度を推定した。水の収支は次の式²⁰⁾により求めた。

$$\int R_a dt - \int F_{riv}^{(out)} dt - \int E_a dt = \int F_G^{(in)} dt$$

ここで、 R_a は実降水量、 $F_{riv}^{(out)}$ は表面流出量（地表流出量）、 E_a は実蒸発散量、 $F_G^{(in)}$ は地下への浸透量であり、単位は全て[mm/年]である。

不浸透面の降水は浸透せずにすべて流出するとした。浸透面については、降水量から表面流出量と実蒸発散量を差し引いた分が地下に浸透するとした。

浸透面の表面流出量は地形、降雨強度や、土壤の浸透性等の要素が影響すると考えられ、文献により異なる報告が見られる。小川（2001）²¹⁾は、モデル畑圃場を用いて、年降水量が1300mmとした場合、蒸発散量が960mm、浸透水量が300mm、表面流出量が30mmと水収支を算定した。ここでは降水量に対する表面流出量の割合は2.3%である。一方、三宅（1978）²²⁾は、神戸市垂水区西部の3つの丘陵地小流域において降雨流出特性を10ヶ月間調査し、総降水量に対する直接流出量（表面流出量）の割合を約21%、25%、17%と算出した。また、塚田（1978）²³⁾は、鹿児島県のシラス台地の水文調査から降雨に対する直接流出率を10%以下と算出した。これらの報告を参考にし、本調査地域は東京都区部であり、土地の傾斜はほとんどないものの、土壤における降水の浸透性は必ずしも高くはないことから、浸透面において年間総降雨量の20%が表面流出するとした。

浸透面、不浸透面の面積は、涵養域の土地利用分類²⁴⁾毎に表-1に示す不浸透面率（文献25を一部修正）から浸透面と不浸透面の面積を算出した。涵養域とは、東京の不圧地下水の等高線図²⁶⁾²⁷⁾から推定される各地点の地下水の集水域を、帯水層が礫層の場合は半径300m、帯水層が砂層の場合半径50mの円にとり、その地域の土地利用分類²⁴⁾をGISを用いて集計したものである。

表-1 土地利用区分と涵養域に占める割合、および不浸透面率²⁵⁾

土地利用区分	涵養域の面積割合	不浸透面率
山林・荒地等	2.5%	0%
田	0.0%	100%
畑・その他の農地	2.3%	0%
造成地	0.0%	1%
空地	3.7%	1%
工業用地	0.8%	70%
一般低層住宅地	23.7%	75%
密集低層住宅地	5.6%	90%
中高層住宅地	3.5%	75%
商業・業務用地	15.5%	90%
道路用地	15.0%	90%
公園・緑地等	7.6%	15%
その他の公共公益	19.5%	85%
校庭が舗装されている場合	-	85%
校庭が土の場合	-	40%
河川・湖沼等	0.1%	100%
その他	0.0%	0%
海	0.0%	100%
対象地域外	0.0%	100%

なお、練馬区においては、雨水浸透ます、透水性舗装や浸透トレンチなどの雨水流出抑制型下水道が導入されている（藤田，1986）²⁸⁾。藤田によると、練馬区で雨水流出抑制型下水道が全面積に導入されている街区を対象とした調査において、降雨の下水道への雨水流出量は、実降雨を用いた場合は導入しなかった場合の26.3%、50mm/hの計画降雨を用いた場合は同じく約40%と算出されている。また、村上²⁹⁾によると、同じく練馬区のある街区において6ヶ月間の66降雨を用いた計算によると、雨水抑制型下水道への雨水流出量は、通常の下水道の場合の32.5%と算出されている。これを用い、練馬区の調査地点の涵養域内の雨水流出抑制型下水道の導入地域については、雨水流出量は通常の下水道の場合の30%とし、70%は地下浸透量になったと考え、さらに透水性舗装面からの蒸発散を考慮して計算した。

浸透面における実蒸発散量の推定にはPenman式の修正式であるMakkink²⁰⁾の可能蒸発散式を用いた。

$$E_p = a \frac{\Delta}{\Delta + \gamma} \frac{R_s}{\lambda} + b$$

ここで、 E_p は可能蒸発散量[mm/day]、 Δ は当該気温に対する飽和水蒸気圧曲線の勾配[hPa/K]、 λ は乾湿計定数[hPa/K]、 R_s は全天日射量[J/(m²・day)]、 λ は気化熱[J/Kg]、 a [-]、 b [mm/day]は地域によ

って異なる定数であり、東京における地域係数³⁰⁾を用いた。また、式の係数には次の近似を用いた³¹⁾。

$$\frac{\Delta}{\Delta + \gamma} = \frac{1}{1.05 + 1.4 \exp(-0.0604T)}$$

ここで T は日平均気温[°C]である。

実蒸発散量 E_a は、 E_p に季節ごとの経験係数 $C^{32)}$ を用いて次の式で求めた。

$$E_a = C \cdot E_p$$

全天日射量、気温、降水量は、試料採取日までの365日間の AMeDAS データ³³⁾を用いた。

表-2 に、涵養域における水収支として、降雨量、流出量、蒸発散量および地下浸透量の平均値を示した。本涵養域における不浸透面積率は71.4%であった。地下浸透量は降雨量の9%にあたる127mm/年、表面流出量は降雨量の72%にあたる979mm/年となった。浸透面における地下浸透量は370mm/年と算出された。この結果は、新井³⁴⁾が武蔵野台地において不浸透面積率80%で地下浸透量が約140mm/年、表面流出量が約1,020mm/年と試算した結果とも整合するものである。

表-2 調査地点の水収支算定結果

	水量(mm/年)	割合
降水量	1,367	100%
地下浸透量	127	9%
実蒸発散量	261	19%
表面流出量	979	72%

(2) 窒素負荷の算出

調査地点の涵養域において生活排水等の窒素汚染の程度を把握するため、生活排水以外の窒素の負荷量を計算した。涵養域において考慮した窒素の負荷源は、降水、水道からの漏水量、畑地における施肥である。調査した涵養域に牧草地や畜舎はなかった。

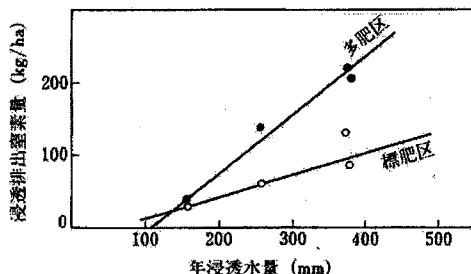


図-5 年浸透水量と浸透排出窒素量の関係³⁵⁾

畑地における窒素負荷は、浸透水量と窒素の地下への溶出量に直線関係があることが知られており²¹⁾³⁵⁾、國松³⁵⁾はいくつかの過去の事例から図-5の関係を作成している。これによると、本調査での畑地での平均浸透速度370mm/年に対応する標肥区の浸透排出窒素量は90kgN/ha/年程度となった。

一方、國松³⁵⁾は肥料中の窒素量と窒素の地下への溶出量との間に次の回帰式を得ている。

$$P_N = 0.32 \cdot F_N + 9.6$$

ここで P_N は窒素の地下への溶出量[KgN/ha/年]、 F_N は肥料中の窒素量[KgN/ha/年]である。この式を用い、東京都区部の施肥による窒素溶出量を推定する。平成16年度で作付面積³⁶⁾が3ha以上の作物を対象とし、施肥量は東京都施肥基準³⁷⁾を用い、単位面積当り平均窒素溶出量を計算したところ、70kgN/haと算出された。

表-3 東京都区部の窒素溶出量の算出

品名	施肥量原単位(kgN/ha)	溶出量原単位(kgN/ha)	作付面積(ha)	溶出量(kgN)	作型名
キャベツ	250	80	84	7,528	春・夏まき
ほうれんそう	160	61	54	3,283	秋・冬まき
だいこん	170	64	36	2,304	春まき
ばれいしょ	200	74	36	2,650	
ネギ	160	61	33	2,006	春まき
さといも	220	80	17	1,360	普通
うめ	170	64	16	1,024	7年生以上成木
くり	140	54	16	870	7年生以上成木
かんしょ	30	19	15	288	
トマト	220	80	15	1,200	早熟(露地)等
はくさい	250	90	14	1,254	春まき
ぶどう	100	42	11	458	5年生以上成木
かき	140	54	11	598	7年生以上成木
にんじん	140	54	11	598	春まき
きゅうり	180	67	11	739	露地
なす	400	138	9	1,238	
タマネギ	160	61	6	365	
レタス	120	48	4	192	
ピーマン	180	67	3	202	露地
キウイフルーツ	150	58	3	173	7年生以上成木
合計			405	28,330	
1ha当り				70	

本調査では、地下浸透量と窒素溶出量の関係と、施肥量と窒素溶出量の関係の二つを考慮し、地下水への窒素溶出量を80kgN/ha/年とした。

降水による窒素負荷は、表-4に示す東京都府中市の1983~1992年の降水水中の窒素濃度³⁸⁾の平均値を用いて0.72mgN/Lとして、前節で算出した降水浸透量により負荷量を算出した。水道漏水による窒素負荷は、東京都水道局の給水水質データ³⁹⁾から、23区内の45地点における平成17年度の硝酸性・亜硝酸性窒素の平均値2.3mg/Lを用いた。23区の漏水量は平成16年度の東京都水道局の漏水量¹⁷⁾7,205万m³

を都区部と多摩地区の平成17年度の一日最大配水量³⁹⁾比で按分した5,312万m³/年とした。涵養域の漏水量は、平成16年度の各区の有収水量比で漏水量を按分し、区の面積で除して面積当たりの漏水量を算出した。これによると、23区の平均漏水量は86.1mmとなった。

表-4 東京都府中市の降水中の窒素濃度(mg/L)

年	NH4-N	NO2-N+NO3-N	無機窒素計
1983	0.37	0.23	0.60
1984	0.41	0.36	0.77
1985	0.40	0.35	0.75
1986	0.52	0.57	1.09
1987	0.41	0.44	0.85
1988	0.40	0.33	0.73
1989	0.26	0.26	0.52
1990	0.32	0.27	0.59
1991	0.27	0.28	0.55
1992	0.45	0.29	0.74
10年平均	0.38	0.34	0.72

6. 地下水の窒素濃度の推定値と実測値との関係

(1) 窒素濃度の推定値と実測値の比較

降水、水道漏水および施肥を考慮した窒素の推定濃度と、実際に測定された無機窒素（アンモニア性窒素+硝酸性窒素）濃度を比較し、推定と実測の整合具合や、他の汚染源の存在を考察する。図-6 に窒素濃度の推定値と実測値の関係を示した。

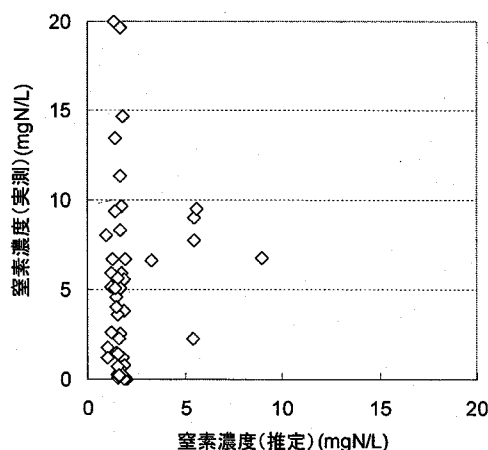


図-6 推定窒素濃度と実測窒素濃度の比較

涵養域に農地のない地点の推定窒素濃度は、降水(0.72mgN/L)と水道漏水(2.3mg/L)の混合であるので

1~2mg/L 程度にあり、平均は 1.6mg/L であった。涵養域に農地を含む地点では推定濃度が増加し、最大で 8.9mg/L と推定された。これに対し、窒素濃度の実測値は 0mg/L から 20mg/L まではばらつきが大きく、51 地点中 61%の 31 地点で実測濃度が推定濃度より高くなっていた。窒素の実測濃度が推定濃度より高かった地点では、推定において考慮した降水、漏水および施肥以外に窒素の起源があると考えられる。実測濃度が推定濃度より低かった地点では、水道の漏水による地下水への供給がない地域であった等の理由が考えられるが、降雨中の窒素濃度の 0.72mgN/L より窒素濃度が低い地下水においては、脱窒が起きている可能性が高いと考えられた。

(2) 推定量を超えた窒素負荷の起源推定と土地利用との関係

窒素濃度の実測値が推定値を上回った地点について、二つの濃度の差と地下水涵養量から、推定量を超えた窒素の単位面積当り負荷量を求め、涵養域の土地利用との順位相関係数を求めた（表-5）。

表-5 窒素余剰負荷量と土地利用区分との相関係数

土地利用区分	涵養域の面積割合	順位相関係数 r
山林・荒地等	2.5%	0.43**
畑・その他の農地	2.3%	0.06
造成地	0.0%	0.09
空地	3.7%	-0.01
工業用地	0.8%	-0.25
一般低層住宅地	23.7%	0.16
密集低層住宅地	5.6%	-0.01
中高層住宅地	3.5%	0.02
商業・業務用地	15.5%	-0.25
道路用地	15.0%	-0.19
公園・緑地等	7.6%	0.13
その他の公共公益(学校・病院など)	19.5%	0.26
校庭が舗装されている場合	-	-0.10
校庭が土の場合	-	0.36*
河川・湖沼等	0.1%	-0.06
その他	0.0%	-0.15

** : 1%で有意, * : 5%で有意

相関係数は山林・荒地や、校庭が土の学校用地に対して有意な正の相関があった。畑・その他の農地や、工業用地、住宅地、商業・業務用地、道路用地とは相関が見られなかった。山林では窒素が吸収され、温帯の森林では窒素の流出は降水による収入よりも少ないことが多い³⁵⁾ことから、山林と窒素負荷に正の相関があることは興味深い。

推定した窒素負荷を超えた窒素負荷量は 6,204kgN/年である。涵養域内の畑地面積 24ha でこの値を割ると 262kgN/ha/年である。前述の國松³⁵⁾が示した窒素の溶出の式を用いると、肥料投与量は年間 788kgN/ha となり、明らかに過大である。このことから、農地への施肥以外に窒素負荷の過剰の原因があることは明らかである。また、工業用地とは相関が見られず、工場からのスポット的な汚染とは考えにくい。よって、この推定量を超えた窒素負荷は面的に広く発生していたものと考えられる。起源として考えられるのは生活排水の下水管等からの漏れや、地質由来の窒素である。

表-6 窒素負荷と面積当り負荷量

	窒素負荷 (Kg/年)	負荷面積 (ha)	負荷量 (Kg/年/ha)	負荷面
施肥	1,897	24	80.0	畑地・その他農地
降水	715	283	2.5	浸透面(透水性舗装部含む)
漏水	1,747	581	3.0	宅地・道路・その他公共用地
未知起源	6,204	581	10.7	宅地・道路・その他公共用地
全体	10,563	783	13.5	涵養域全体

表-6 に窒素負荷と面積当たりの負荷量を示した。仮に、推定量を超えた窒素負荷が住宅地、商業用地、道路用地、その他の公共公益等の市街地で発生する場合、面積当り負荷量は 10.7kgN/ha/年と算出される。人間の 1 人 1 日当り全窒素排出量を下水道施設計画⁴⁰⁾と同じ 12g/人/日、人口密度を東京都 23 区の平均人口密度である 135 人/ha¹⁷⁾、23 区の宅地割合を 56.6%¹⁷⁾とすると、宅地から発生する生活排水由来の全窒素は 23 区平均で 1,045kgN/ha/年となる。これを用いて、前述の市街地の面積で推定量を超えた窒素負荷を序した値 10.7kgN/ha/年を割ると 1.0%となる。このことは、生活排水のうち最大で 1.0%が地下へ流出している可能性があるということになる。既知の窒素汚染源からの推定量を超えた窒素負荷の起源には、地質由来の窒素の寄与量など不明な部分があり、今後は、さらなる研究が必要といえる。

7. まとめ

地下水の汲み上げとその利用が今後ますます増加すると考えられる東京都区部において地下水水質を

測定したところ、不圧地下水、被圧地下水ともに窒素濃度が 10mg/L を超える高濃度の地点が存在した。不圧地下水の窒素の形態は酸化還元状態に依存し、都区部西側の台地においては硝酸性窒素が卓越して検出され、都区部東側の低地においてはアンモニア性窒素が卓越して検出された。

各地点の土地利用と水収支から、降水、水道漏水および施肥を起源とした窒素濃度の推定を行ったところ、全体の 6 割の地点で実測窒素濃度が推定値を上回っていた。推定量を超えた分の窒素負荷量は面的に広く負荷されていたものと考えられ、生活排水の漏れや地質由来が考えられた。推定量を越えた窒素負荷が市街地において面的に発生したと考えた場合、窒素負荷量は 10.7kgN/ha/年と算出された。この窒素負荷に生活排水の漏れが寄与しているとする、生活排水の地下への漏水割合は最大で 1.0%と考えられた。

今後は、窒素安定同位体等のマーカーを用いて生活排水の漏れを検証するとともに、水収支や肥料投入量等のパラメータの精度を高め、窒素濃度の推定の精度を高めることが必要と考えられる。

参考文献

- 1) 清水満：建設工事、地下構造物に見られる地下水問題、日本応用地質学会 H16 特別講演およびシンポジウム予稿集、pp. 26-33, 2004.
- 2) 川島眞一、2001：東京都における地下水位の経年変化、基礎工、Vol.29, No.11, pp. 77-79, 2001.
- 3) 古藤田喜久雄、若松加寿江：関東大地震の液状化地図、基礎工、Vol.6, No.11, pp. 77-90, 1978.
- 4) 日本水道協会：地下水利用専用水道の拡大に関する報告書、2005.
- 5) 環境庁水質保全局水質管理課・土壌農薬課監修 平田健正編著：土壌・地下水汚染と対策、(社)日本環境測定分析協会、pp. 150-151, 1996.
- 6) Behnke, J. : A summary of the biogeochemistry of nitrogen compounds in ground water, Journal of Hydrology, Vol. 27, pp. 155-167, 1975.
- 7) 環境庁：地下水の水質汚濁に係る環境基準について、平成 9 年 3 月 13 日、環境庁告示第 10 号, 1997.
- 8) 環境省 HP：平成 17 年度地下水質調査結果。<http://www.env.go.jp/water/report/h18-08/index.html> 2007 年 5 月 20 日訪問
- 9) 東京都環境局 HP：地下水環境調査結果, 2004. <http://www.kankyo.metro.tokyo.jp/> 2006 年 2 月 1 日訪問
- 10) 国包章一、真柄泰基：地下水の窒素汚染とその原因に関する基礎的考察、衛生工学研究論文集、Vol.20,

pp.121-130, 1984.

11) 田瀬則雄：硝酸・亜硝酸性窒素汚染対策の展望，水環境学会誌，Vol.26, No.9, pp. 546-550, 2003.

12) Ford, M., Tellam, J. H., : Source, type and extent of inorganic contamination within the Birmingham urban aquifer system, UK, Journal of Hydrology, 156, 101~135, 1994.

13) Wakida, F. T., Lerner, D. N.: Non-agricultural sources of groundwater nitrate: a review and case study, Water research 39, pp. 3-16, 2005.

14) Fenz, R., Blaschke, A.P., Clara, M., Kroiss, H., Mascher, D., and Zessner, M.: Quantification of sewer exfiltration using the anti-epileptic drug carbamazepine as marker species for wastewater, Water Science & Technology, Vol.52, No.9, pp. 209-217, 2005.

15) Eiswirth, M., Hotzl, H.: The impact of leaking sewers on urban groundwater - In: CHILTON, J. et al. (ed.): Groundwater in the urban environment. Vol. 1: Problems, Processes and Management, pp. 399-404, 1997.

16) 山本耕司，大宮季宏，吉岡均，鶴保謙四郎：都市域の地下水における無機態窒素の組成と分布，水環境学会誌，Vol. 21, pp. 250-254, 1998.

17) 東京都統計年鑑，2004.

18) 東京都水道局パンフレット，東京の漏水防止，平成15年度版

19) 東京都労働経済局農林水産部：土地分類基本調査CD-ROM, 2001.

20) 登坂博行：地圏水循環の数理，東京大学出版会，2006.

21) 小川吉雄：地下水の硝酸汚染と農法転換，pp68-71，農文協，2000.

22) 三宅紀治：日本の水収支，市川正巳，樞根 勇編，pp77-88，古今書院，1978.

23) 塚田公彦：日本の水収支，市川正巳，樞根 勇編，pp88-103，古今書院，1978.

24) 国土地理院：細密数値情報(10m メッシュ土地利用)首都圏，CD-ROM，1994.

25) Corbitt, R. A.: Standard Handbook of Environmental

Engineering, 2nd ed, pp. 7.21-7.22, McGraw-Hill, 1998.

26) 東京都土木技術研究所：東京低地の液状化予測，1987.

27) 東京都土木技術研究所：東京都総合地盤図 I 東京の地盤(1)，1977.

28) 藤田昌一：雨水流出抑制のための実験的下水道に関する研究，衛生工学研究論文集，Vol. 22, pp. 175-185, 1986.

29) 村上道夫：都市ノンポイント汚染源由来の重金属類の雨水浸透施設における吸脱着，東京大学博士論文，2005.

30) 永井明博，田中丸治哉，角屋睦：ダム管理の水文学，森北出版，2003.

31) 角屋睦，永井明博：長短期流出両用モデルの永源寺ダム流域への適用と考察，農業土木学会論文，Vol. 137, pp.71-78, 1993.

32) 樞根 勇：水文学，大明堂，1980.

33) 気象庁 HP <http://www.jma.go.jp/jma/index.html> 2007年5月23日訪問

34) 新井正：都市の水文環境，pp. 36, 共立出版，1987.

35) 國松孝男：河川負荷のモデル解析，pp.59-63, 技報堂出版，1989.

36) 農林水産省：グラフと統計でみる農林水産業 <http://www.toukei.maff.go.jp/shityoson/index.html> 2007年8月4日訪問

37) 東京都産業労働局農林水産部：農作物施肥基準，2003.

38) 雨水貯留浸透技術協会：雨水利用ハンドブック，1998，山海堂

39) 東京都水道局 HP <http://www.waterworks.metro.tokyo.jp> 2007年5月16日訪問

40) 下水道施設計画・設計指針と解説 前編，日本下水道協会，1994.

(2007.5.25 受付)

Source Estimation of Nitrogen Contamination in Groundwaters in Tokyo Metropolitan Area

Keisuke KURODA¹, Tetsuo FUKUSHI¹, Satoshi TAKIZAWA¹, Masaatsu AICHI², Takeshi HAYASHI³, and Tomochika TOKUNAGA²

¹Dept. of Urban Engineering, Graduate School of Engineering, The University of Tokyo

²Dept. of Environmental Systems, Graduate School of Frontier Science, The University of Tokyo

³Faculty of Education and Human Studies, Akita University

With the emergence of rising groundwater problem and the growing importance of groundwater for various uses such as emergency water source, groundwater in urban area is expected to be used for beneficial uses. Hence, the groundwater quality of Tokyo metropolitan area was investigated in order to evaluate the characteristics and pollution. In total 106 groundwater samples were collected from both unconfined and confined aquifers. Nitrogen was the most prevalent contaminant detected from both confined and unconfined aquifers, but geological conditions determined the predominant nitrogen species found in groundwaters. In the western terrace area of Tokyo, only nitrate was detected, whereas in the eastern delta area ammonia nitrogen was predominant in the alluvial sandy aquifer. An estimation of nitrogen source using water balance and land use showed that measured nitrogen concentration exceeded the estimated levels in approximately sixty percent of samples, which indicated leaking domestic wastewater as a possible source of contamination.