

課題 2 (3) 地下水中の窒素循環に関する調査研究

はじめに

地下水への窒素負荷の割合が多いと思われる畑地を対象として、地下圏の窒素循環を把握することを目的とした。このため、印旛沼周辺の台地の中から小規模な台地を選定し、この地域における地下圏の窒素循環を調査することにした。印旛沼周辺の北総台地は同じような地質条件にあるため、ここで得られた成果をもとに印旛沼流域全体の畑地から地下水に供給される窒素負荷量について推定することにした。

地下水中の溶存物質は、地下水の移流に伴って移動する。したがって、地下圏の窒素循環を把握するには、まず地下水の循環を解明する必要がある。以下に、調査地区における地下水循環と窒素循環について順に述べる。

1. 地下水循環

1-1. 調査地の地形

印旛沼干拓地の南側に位置する台地（佐倉市飯田台）を調査地域とした。この台地は、東西 600m、南北 400m 程度の広がりを持ち、南側の一部で隣接する台地と接しているものの、周辺の台地からほぼ独立した形状を有している。台地の標高は 27m 前後で、緩やかな起伏がある。

台地の土地利用状況をみると、南側に集落が形成され、北側は畑地となっており、居住区と畑地がほぼ明瞭に分かれている。台地周辺の沖積低地は標高 5m 前後であり、水田として利用されている。

台地上の民家はすべて井戸水を利用している。古い時代につくられた井戸は、直径が 1 m 程度のまる井戸で、深度は 20m 以下である。一方、近年つくられた井戸は、直径 10cm 程度の塩化ビニール管で、深度は 30m 以上のものが多い。

台地の北側、東側および南側に接する低地には、それぞれ湧水池がみられる。また、台地の西側に接する低地には素掘りの水路があり、ときおり湧水が観察される。

1-2. 水文地質構造

台地上の 4 地点で地質ボーリング調査を実施した（位置は図 1 参照）。以下に、地下地質と帯水層について述べる。

地質ボーリング調査にみられた地下地質は、地表から約 1m まで盛土層、その下位に関東ローム層、常総粘土層が発達する（図 2）。その下位には、標高 5m まで細粒砂～極細砂を主体とした砂層が続いており、所々シルト層を挟んでいる。そして、標高 10m 前後にみられるシルト層は、生痕が多くみられるものの、50cm 以上の厚さがあり、水平方向に連続していることが確認された。既存の地質ボーリング資料を考慮するとこのシルト層は緩く南側に傾斜していると考えられる。台地の南西側斜面では、このシルト層を観察することができるが、その上面からの地下水の湧出量は少ない。

この連続するシルト層を第 1 難透水層と呼ぶことにし、これより上位の砂層を第 1 帯水層、下位の砂層を第 2 帯水層と呼ぶことにした。なお、印旛沼周辺の北総台地には、関東ローム層の下部に宙水が存在することが知られている（柴崎ほか、1966）。

前述した家庭用のまる井戸は井戸深度の測定から、第 1 帯水層の地下水を利用していることが明らかになった。また、台地の周辺にみられる湧水は、その標高から第 2 帯水層の地下水が湧出していると考えられる。

1-3. 地下水位と地下水流動

地下水位の測定や地下水の採取のため、地質ボーリング調査を実施した 4 地点に、それぞれ第 1 帯水層の観測井を設置した。さらに、家庭用のまる井戸の 1 つを、第 1 帯水層の観測井として使用した。また、No. 1 地点、No. 2 地点、No. 3 地点には宙水層の観測井を、No. 1 地点には第 2 帯水層の観測井をそれぞれ併設した（表 1）。



図1 調査地の位置図

●:家庭用井戸, ▲:湧水, ★:地質ボーリング地点, ■:既存地質ボーリング

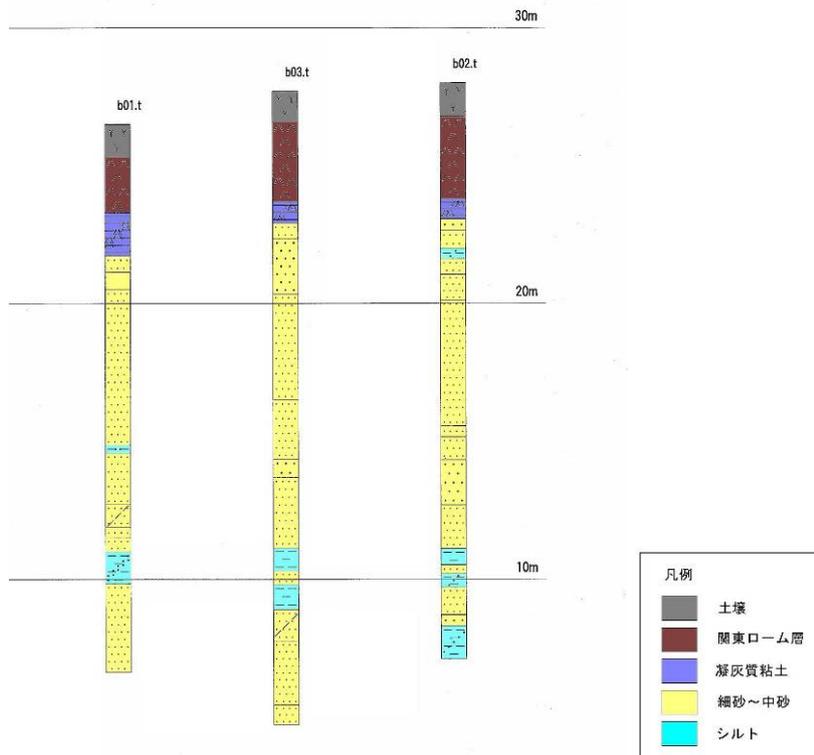


図2 ボーリング調査結果

各観測井の管頭標高は、No. 4 地点の近傍に位置する三角点 (TP+27.4m) を基準にして、水準測量により求めた。

表 1 各地点の観測井設置状況

	宙水層	第1帯水層	第2帯水層
No.1地点	○	○	○
No.2地点	○	○	
No.3地点	○	○	
No.4地点		○	

1-3-1. 宙水層

No. 1 地点、No. 2 地点、No. 3 地点とも、設置した宙水層の観測井で地下水位が観測されなかった。したがって、この台地では、関東ローム層の下部には宙水がほとんど形成されないか、形成されたとしても非常に薄いと思われる。

1-3-2. 第1帯水層

観測された第1帯水層の地下水位を図3に示す。

地下水位の変動は、欠測している期間を除き、5箇所の観測井でほぼ同じパターンを示している。すなわち、2005年7月末と2006年7月下旬に極小値を示し、2005年10月中旬と2007年の2月中旬に極大値を示している。このような水位変動は、北総台地で一般的にみられる1年を周期とした変動とは明らかに異なっている。この帯水層では大規模な揚水がないため、地下水位の変動が雨量にのみ依存しているためと考えられる。ただし、雨量の多い時期と地下水位の高い時期がずれていることから、雨水が第1帯水層に降下するのにある程度の時間を要していることが推定される。

第1帯水層の地下水位分布を図4に示す。地下水位は、No. 3 地点付近を通る南北方向に高まりがあり、そこから東側と西側に向かって低下している。

この形態は、地下水位の高い時期も低い時期もあまり変化していない。この地下水位分布から第1帯水層の地下水は、No. 3 地点より東側では東方向、西側では西方向に流動していると推定される。

また、隣接する南側の台地の方向にも地下水位が

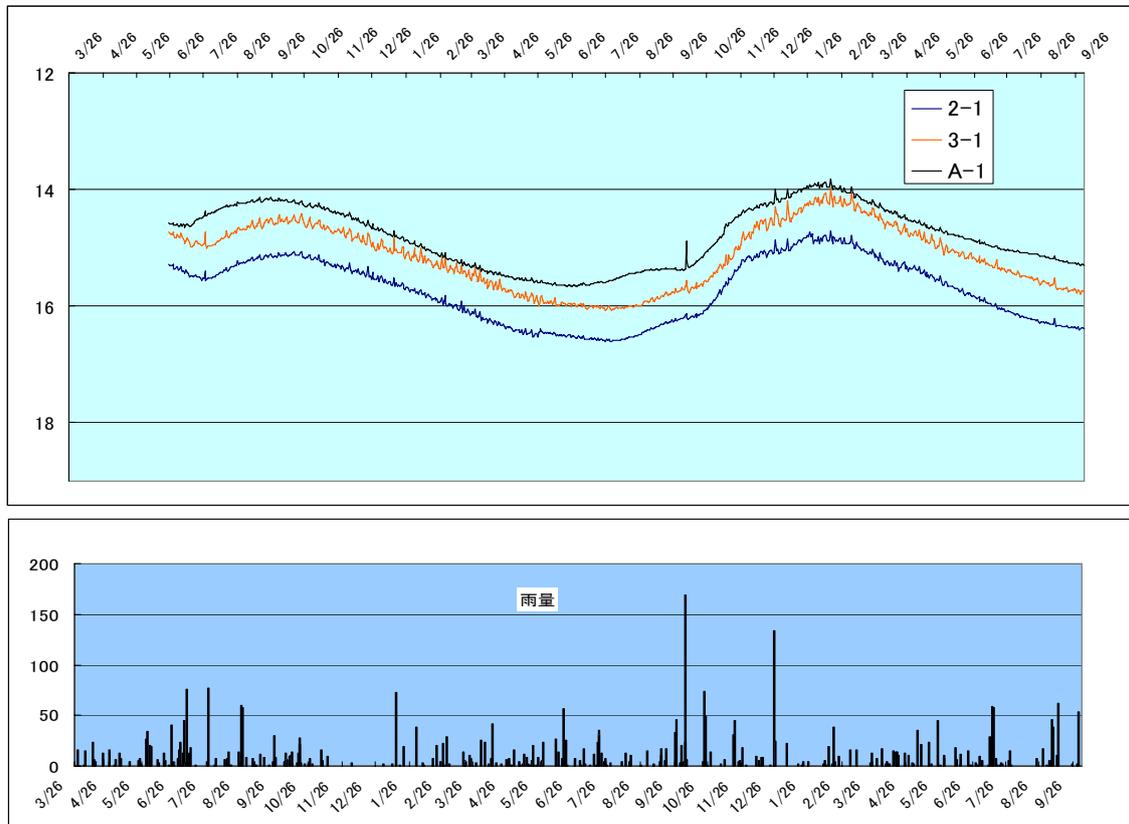


図3 第1帯水層の地下水位変動と雨量

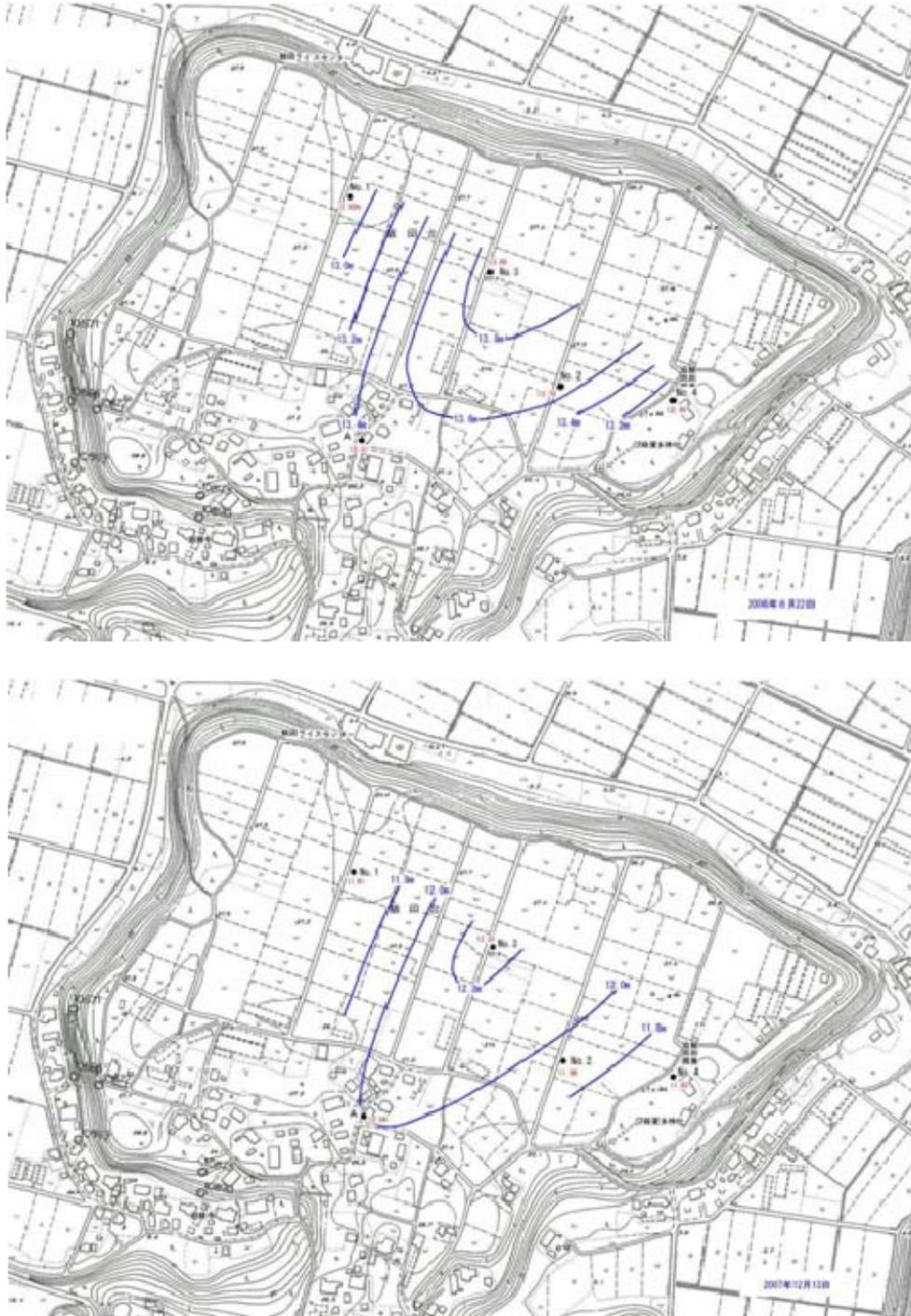


図4 第1帯水層の地下水位分布（上：高水位期，下：低水位期）

低下していることから、南側の台地から地下水が流入することはないと考えられる。したがって、第1帯水層の地下水質についても他地域の影響を考える必要がないことが判明した。

1-3-3. 第2帯水層

No. 1 地点に設置された2つの観測井の水位を比

較すると、第2帯水層の地下水位は第1帯水層の地下水位より5m程度低くなっており、第1難透水層が難透水層として有効に作用していることがわかる。

次に、第2帯水層の地下水位と第1難透水層の下面とを比較すると、前者のほうが后者より低くなっている。したがって、第2帯水層は第1帯水層と同

様に、地下水面の存在する帯水層，すなわち不圧帯水層であると考えられる。このことから，第1帯水層から第2帯水層に降下する地下水量は，第1帯水層の地下水位にのみ依存し，第2帯水層の地下水位には影響されないことになる。

1-4. 地下水の水収支

1-4-1. 降雨の地下浸透

地下水循環を考える上で，降雨の何割が地下浸透して地下水になるかは重要な課題である。ここでは，成田市三里塚で観測された降雨量と地下浸透量の測定データ（「千葉県地盤沈下と地震」で公表）を使用して，降雨の地下浸透割合を算出することにする。

1988年から1992年までの測定データの中から，降水量と地下浸透量が計測された69例についてまとめた（図5）。降水量と地下浸透量が比例関係にあると仮定すると，降雨の28%が地下浸透していることになる。ただし，近似する直線から外れるものも多いことから，降雨の地下浸透は，たとえば表層部分の湿潤状態など，降水量以外の条件にも左右されていると考えられる。

なお，成田市三里塚の測定は公園の緑地で行われていることから，ここで得られた降雨の浸透割合は，畑地に比べて若干低い可能性がある。

1-4-2. 第1帯水層の水収支

雨量の多い時期と第1帯水層の地下水位の高い時期がずれていることについては既に述べた。そこで，1回の降雨で地下に浸透した水が，時間的にどのように分散されて第1帯水層に達するかを計算により求めてみた。

図6に第1帯水層の水収支を概念的に示す。入力としては雨水を起源とする地下水の降下量があり，出力として第2帯水層に降下する水量がある。このほか地下水流動に伴う水平方向の流入と流出があるが，ある程度の面積を対象に考えると水平方向の流動量は，垂直方向の流動量に対して相対的に減少する。水平方向の流入量と流出量の差はさらに小さいことから，ここでは垂直方法の水収支だけを考

ることにする。このときの水収支は次式で表される。

$$Q(t) - Kz \cdot H(t) = Ss \cdot dH(t)/dt$$

ここで， $H(t)$: 第1帯水層の基底を基準にした地下水位
(第1帯水層の水深)

Kz : 第1帯水層下位の難透水層の透水量係数
(垂直方向)

Ss : 第1帯水層の貯留係数。

ただし，以下の計算では，第1次近似として時間微分の項を無視することにする。

さて，1回の降雨の後，時間経過に伴って第1帯水層に降下する水量のパターンが同じであると仮定し，このパターンを時間関数 $h(t)$ で表す。この関数を，降水のインパルス応答関数とよぶ。これにより，第1帯水層に降下する水量は次式で表される。

$$Q(t) = \int R(t-z) \cdot Cr \cdot h(z) \cdot dz$$

ここに， $R(t)$: 降水量

Cr : 降水の浸透割合。

これらの関係式を離散値形式で表現した次式を用い，最小2乗法により $P1 \sim Pm$ を求めた。

$$\sum_{j=1}^m Ri-j \cdot Pj = Hi$$

ここに， P : $Cr \cdot h / Kz$ の離散値

R : 日ごとの降水量

H : 日ごとの地下水位

得られた地点ごとのインパルス応答関数を図7に示す。なお，降水量は気象庁の佐倉アメダス観測所の日降水量を用いた。また，インパルス応答関数の項数(上式の m)は400，すなわち400日分である。また，得られた応答関数を検証するため，降水量と応答関数から地下水位を計算し，観測された地下水位と比較した（図8）。

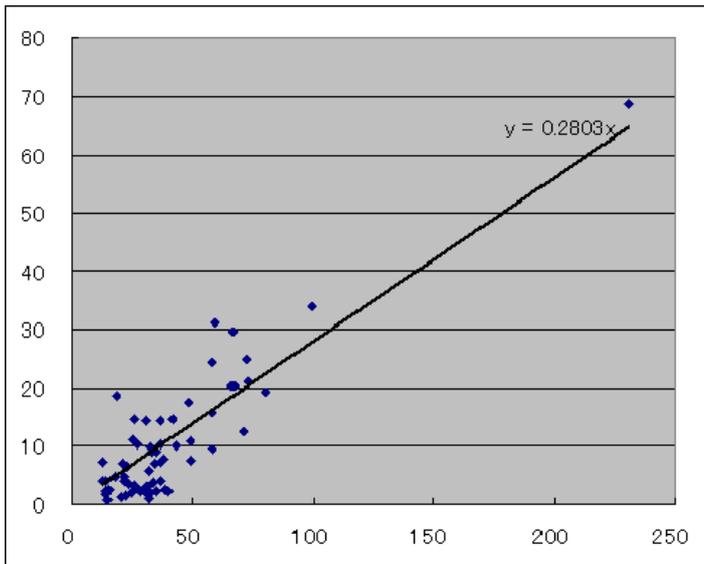


図5 成田市三里塚における降水量と地下浸透の関係（単位：mm）

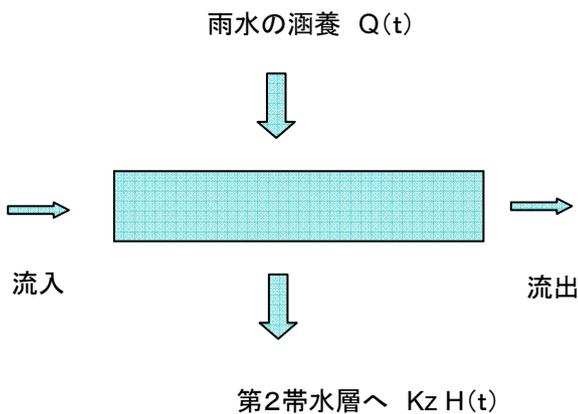
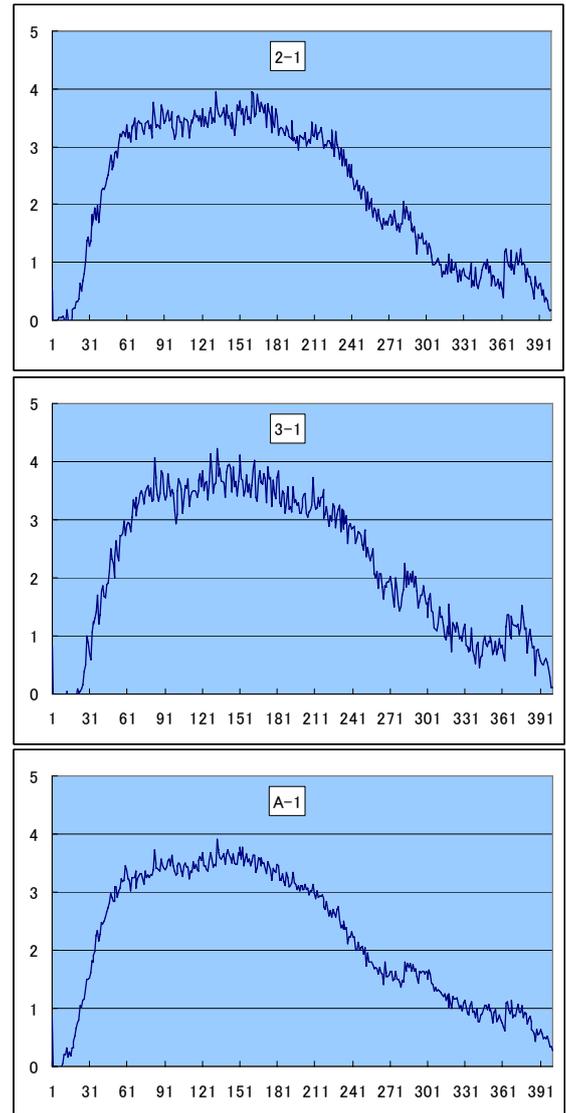


図6 第1帯水層の水収支

得られたインパルス応答関数をみると、地下に浸透した降水の影響が長時間つづくことがわかる。影響の大きい期間は、降水から40～200日後である。また、インパルス応答関数には、降水直後の地下水位変動に対応する1日目の立ち上がりもみられる。降水直後の水位応答と、40～200日後の水位応答は、異なる降下メカニズムが対応していると思われるが、今後の検討事項であろう。

逆計算で求めた地下水位は、実測水位と異なる部分もあるが、おおむね一致していると考えられる。



横軸：日数

縦軸：h・Cr・Kz

図7 降水のインパルス応答関数

インパルス応答関数を求める場合、応答が線形であることを前提にしている。しかし、前述した成田市三里塚における地下浸透測定データにみられるように、個々の降雨に対する浸透量は必ずしも線形ではない。それでも、応答関数から求めた地下水位が実測水位に近いことは、個々の降雨に対する水位の応答が線形でなくとも、統計的にみたときに線形応答で近似することができることを示していると考えられる。

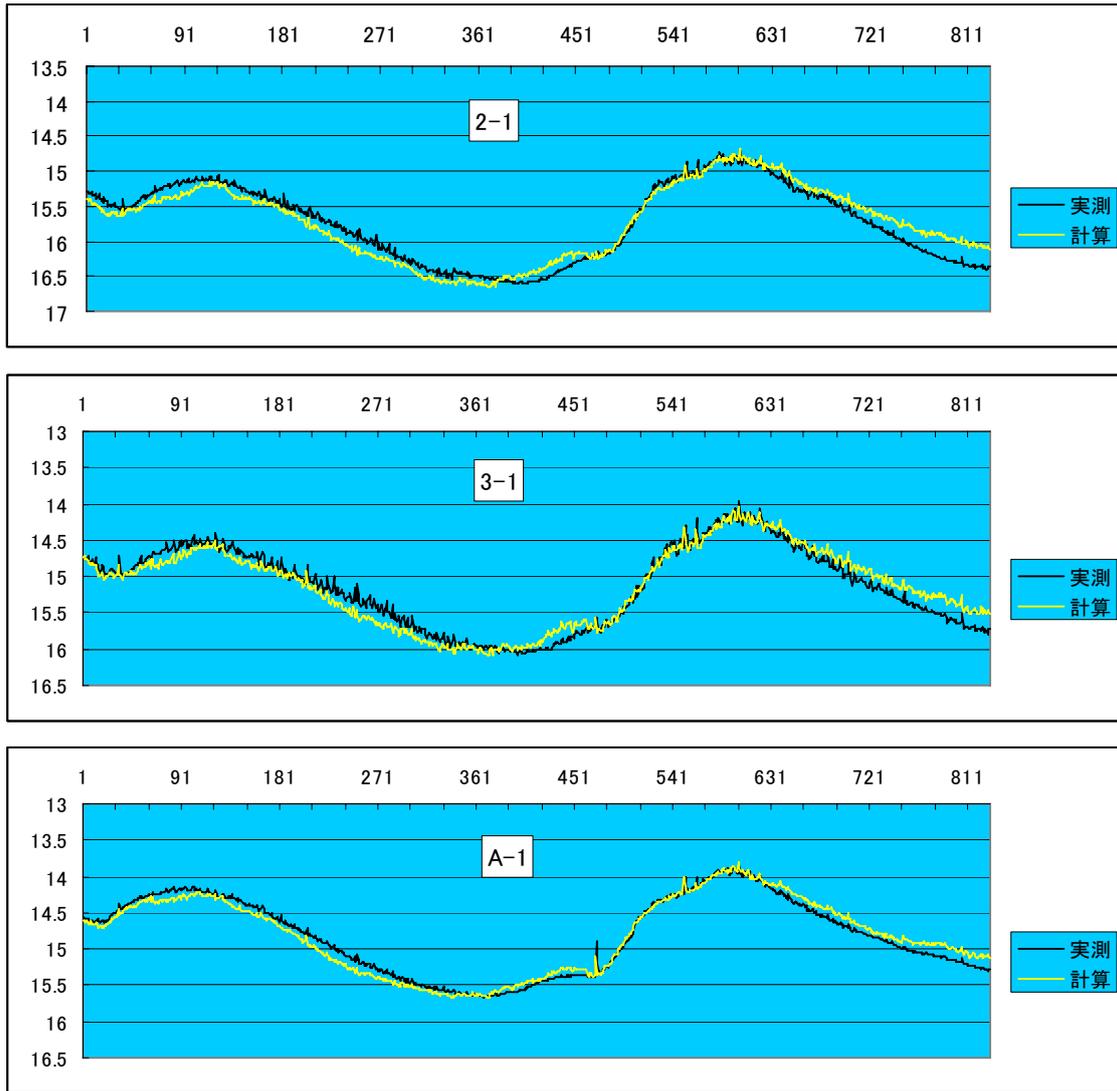


図8 応答関数から計算した地下水位と実測水位の比較

ところで、降水の影響が長時間にわたるといふことは、木村（1986）が指摘しているように、地下水面より上位の地層に多量の水が含まれていることを示唆していると考えられる。地下水の涵養は、地下に浸透した雨水が順番に下位の水を押し下げるピストン流により地下水が涵養されているといわれており、降水が第1帯水層に達する時間は、応答関数から求められる時間よりはるかに長いと考えられる。

2. 窒素循環

2-1. 地層中の窒素含有量

地質ボーリングで得られたコアを、深度別に採取し、地層中の窒素濃度を測定した。採取した試料は、

110℃で6時間以上乾燥した後、礫や植物根等を除去し、乳鉢で粉末状にして測定試料とした。測定にはCHN分析計を用いた。

測定された窒素濃度をみると、地層区分に従ってグループ化することができる（図9）。まず、土壌層の窒素濃度は2,300～3,000mg/kg（平均2,710mg/kg）であり、他の地層より高い値を示している。ついで、関東ローム層で1,100～1,400mg/kg（平均1,200mg/kg）、常総粘土層で150～280mg/kg（平均180mg/kg）、下総層群の地層で20～180mg/kg（平均70mg/kg）であり、下位の地層ほど窒素濃度が低下していることがわかる。

地表から第1帯水層基底までの地層について、土壌層、関東ローム層、下総層群の3つに区分し、そ

それぞれの地層ごとの窒素含有量（単位面積当たり）を求めてみた（表2）。なお、常総粘土層については下総層群に含めている。窒素含有量の算出は、各地層の窒素濃度の平均値に、地層ごとの単位体積重量（乾燥密度）と層厚を乗じて求めた。使用した単位体積重量は、土壌層については安西ほか（1988）の測定値を、関東ローム層と下総層群については土質工学会の値を参考にした。

算出された各地層の窒素含有量をみると、土壌層が最も多く、ついで関東ローム層、下総層群の順になっているが、それぞれの差は少なく、ほぼ同程度であるといえる。

2-2. 地下水中の窒素含有量

観測井の地下水および湧水を採取し、イオンクロマトグラフ装置で硝酸性窒素を測定した。測定結果を表3に示す。地点ごとに硝酸性窒素濃度をみていくと、幾つかの地点で経時変化がみられるが、おおむね安定した濃度を示している。

第1帯水層の観測井の窒素濃度を比較すると、畑地の中に位置する1-1観測井、2-1観測井、3-1観測井では比較的高い値がみられ、裸地に位置する4-1観測井や、民地に位置するA-1観測井では比較的低い値になっている。このことから、本調査地域では、地下水中の窒素濃度は、その地点近傍の窒素負荷量の影響を受けやすいと考えられる。このことからさらに、第1帯水層では垂直方向の流動が卓越しており、水平方向の地下水流動の影響が相対的に低くなっている可能性があると考えられる。

また、2-1観測井で高濃度が継続していることから、No.2地点の比較的近傍に、この地区の畑地の平均的な負荷量より大きな窒素負荷源があると考えられるが、他の観測井の濃度と差があることから、その面積はあまり広くないと想像される。

湧水の窒素濃度をみると、台地の東側および南側の湧水で高く、西側の湧水では比較的低くなっている。西側の湧水は、地下水位が低いときに涸れてしまうこと、台地斜面からやや離れていることから、低地側に降った雨の影響を受けている可能性がある。なお、5箇所ある第1帯水層の観測井の平均値

は14.1mg/L、4箇所の湧水の平均値は9.6mg/Lであり、平均値では湧水の方が低い値を示している。

さて、地下水中の窒素濃度を、前述した地層中の窒素濃度と比較すると、後者の方が非常に高いことがわかる。No.1地点にみられた地層中の窒素濃度は、下総層群の砂層で最も低くなり、40mg/kg前後の値を示している。一方、地下水に飽和された下総層群の砂層は、乾燥状態の地層重量の1/2程度の水分（重量）を含んでいる。したがって、測定された地層中の窒素がすべて可溶性であるとする、地下水中の窒素濃度は80mg/L程度になることになる。しかし、No.1地点で観測された地下水の窒素濃度は、平均で12mg/Lであり、両者の値には隔たりがある。このことから、地層に含まれる窒素化合物の大半は水に不溶な形態であると推論される。下総層群より上位の地層では、地層中の窒素濃度が高いため、可溶性の窒素化合物の割合は下総層群の場合より低くなると思われる。

3. まとめ

調査地の地下地質は、上位から土壌層、関東ローム層、常総粘土層、下総層群からなる。下総層群の砂層中に地下水が存在し、標高10m付近に挟まれるシルト層の上位を第1帯水層、下位を第2帯水層とよぶ。第1帯水層、第2帯水層とも不圧帯水層である。

第1帯水層の地下水位分布の解析から、隣接する地域からの地下水流動がなく、地下水質についても他地域の影響を受けないことがわかった。

第1帯水層の地下水位変動に対する降水の影響を把握するため、降水のインパルス応答関数を算出した。これにより、地下水位に対する降水の影響は、降水直後と40~200日後に現れることが明らかになった。

地層中の窒素濃度は、地層区分に従ってグループ化できる。各地層の平均窒素濃度は、土壌層2,710mg/kg、関東ローム層1,200mg/kg、常総粘土層180mg/kg、下総層群70mg/kgであった。また地層ごとの窒素含有量（単位面積当たり）は、土壌層1,900g/m²、関東ローム層1,700g/m²、下総層群（常

総粘土層上端～第1帯水層基底) 1,600g/m²で、あまり差がなかった。地層中に含まれる窒素化合物の大半は水に不溶な形態であると考えられる。

第1帯水層における地下水の窒素濃度は、近傍の窒素負荷量の影響を強く受けていると思われる。第1帯水層と湧水の平均窒素濃度はそれぞれ14.1mg/L, 9.6mg/Lであった。

年間降水量1400mm, 降雨の地下浸透割合28%, 第1帯水層の平均硝酸性窒素濃度14.1mg/Lを用い、単位面積当たりの窒素供給量(年間)5.5 g/m²・yを得た。なお、土壌層に含有される窒素量は、この量の約350倍になる。

謝辞

最後に、調査に快く協力していただいた飯田台の住民の方々に厚くお礼申し上げたい。

引用文献

地質環境研究室, 千葉県地盤沈下と地震, 14, 1982.
地質環境研究室, 千葉県地盤沈下と地震, 15, 1983.

地質環境研究室, 千葉県地盤沈下と地震, 16, 1984.

地質環境研究室, 千葉県地盤沈下と地震, 17, 1985.

地質環境研究室, 千葉県地盤沈下と地震, 18, 1986.

地質環境研究室, 千葉県地盤沈下と地震, 19, 1987.

千葉県農林部園芸農産課, 2008, 主要農作物等施肥基準.

安西徹郎・篠田正彦・八槇敦・戸辺学・在原克之・渡辺春朗, 1988, 千葉県における主要農耕地土壌の実態と変化—ここ15年間の解析—, 千葉県農業試験場技報, 39, 71-86.

木村重彦, 1986, 水に含まれる放射性同位体による地下水の挙動, 農業土木試験場報告, 25, 1-92.

柴崎達雄・志村馨・佐藤昭, 1966, 印旛沼周辺の水文地質構造, 資源研い報, 67,

土質工学会: 土質試験の方法と解説

八槇敦・斉藤研二・安西徹郎, 2003, 千葉県における農地に関する窒素収支, 千葉県農業総合研究センター研究報告, 2, 69-77.

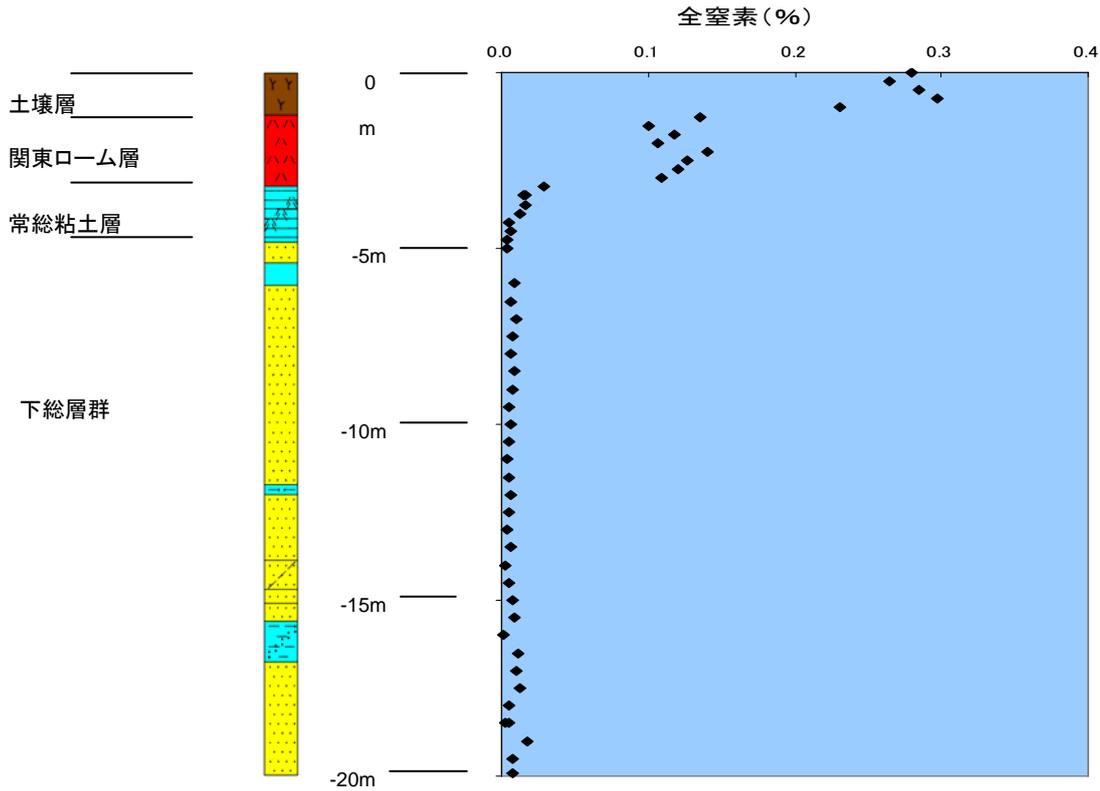


図9 地層中の窒素濃度 (No1地点)

表2 第1帯水層基底までの各地層に含有される窒素

	平均N濃度 g/kg	層厚 m	単位体積重量 kg/m ³	N含有量 g/m ²
土壤層	2.7	1.0	700	1,900
関東ローム層	1.2	2.0	700	1,700
下総層群 *1	0.078	13.0	1,600	1,600

*1 常総粘土層を含む

表3 観測井の地下水および湧水の硝酸性窒素 (mg/L)

NO3-N 測定日	観測井						湧水			
	第1帯水層					第2帯水層	東	北	西	南
	1-1	2-1	3-1	4-1	A-1					
2005/12/12		18.9	11.0		5.8	16.0	15.7	6.1		
2006/01/24		30.7	9.7		5.2	20.1	12.8	4.9	6.3	
2006/03/13		27.3	10.6		6.2	25.7	14.3	5.3	8.9	10.0
2006/04/11		28.6	10.9	8.2	6.3	21.2	14.3	5.3	7.2	10.0
2006/08/23		30.9	10.2	7.3	4.5	5.2	12.6			9.9
2006/11/10	20.3	34.2	12.2	9.9	4.8	5.1	15.0	5.4		10.5
2006/12/05	12.6	37.7	11.6	10.7	6.1	13.1	16.6	5.3		10.7
2007/01/30	12.2	33.5	10.2	12.4	5.8	23.2	17.7	5.7	11.6	10.5
2007/04/19	7.1	33.5	16.5	11.5	6.0	16.8	18.4	4.1	9.8	10.1
2007/06/13	5.6	31.6	16.8	8.9	7.4	11.0	17.0	4.1	8.7	10.0
2007/10/03	15.8	30.1	14.0	6.6	5.5	11.4	17.1	1.9	7.3	9.9
2007/12/13	9.9	27.9	19.9	9.0	5.4	12.1	16.2	4.3	2.6	9.7
平均	11.9	30.4	12.8	9.4	5.8	15.1	15.6	4.8	7.8	10.1