

発生源における窒素・リンの排出状況をみると、生活系・産業系・面原系のうち面原系の占める割合は突出して増加しています（第 15 章）。また、窒素・リン化合物は、化学変化を起こしやすい物質です。集水域の汚濁発生源から河川を流れて印旛沼に注ぐ間に、窒素・リンは、生物による吸収分解や土壤による吸着脱着、それに酸素のある酸化状態の台地と酸素のない還元状態の低湿地を通るときに複雑な酸化還元反応を起こしています。どのような化学変化を起こしているのでしょうか。

まず、窒素について見ることにしましょう。

1 台地から谷津低地に流れるまで

台地上の山林、畑、住居地などでは、落ち葉や各種排水中の有機物が分解し、それに含まれる蛋白質のような有機態窒素は無機態のアンモニア (NH_4^+) に変化します。畑では、その他に肥料として硫安のような形でアンモニアが施用されます。土壤はマイナスに帯電しているので、プラスイオンのアンモニアは土壤に吸着されて土壤中に留まりやすくなっています。

山林や畑の土壤は酸素を含む酸化状態ですから、アンモニア (NH_4^+) は土壤細菌の硝酸化成菌等の作用によって酸化されて硝酸 (NO_3^-) に変化します。硝酸はマイナスイオンですから土壤に吸着されることなく雨水の地下浸透とともに地下へ移動します。したがって地下水中の窒素は、殆ど硝酸態窒素であり、地下水が再び地表に流出した谷津の湧水に含まれる窒素もほとんど硝酸態窒素です。また、普通の河川は水中に十分な酸素を含んでいるので、アンモニアは河川を流れる間に酸化されて硝酸になります。

2 湧水の硝酸汚濁

下総台地の谷津は至る所に湧水がみられます。湧水に含まれる硝酸態窒素の濃度について、湧水涵養域が山林、畑からなる下総台地で調査した事例¹⁾によると、図 16-1 のように、山林を涵養域とする湧水の窒素濃度は低く、畑地を涵養域とする湧水は高く、山林、畑の混在するところはその中間になっていました。

近年の畑作は、ムギ、雑穀などの粗放作物から野菜を中心とした集約作物に切り替えられ、窒素施肥量は数倍²⁾になっています。施肥窒素の一部は作物に吸収されずに土壤中に残留するので、それが湧水の窒素汚濁に影響する可能性があります。

窒素肥料を大量に使う野菜栽培（第 10 章 3）や窒素を多く含む廃棄物を出す畜産が盛んになった時期は最近のことです。湧水の窒素汚濁は、その頃から進んだと考えられます。なお、土壤中の残留窒素を減らす野菜等の栽培技術は、最近、急速に進んでいます³⁾⁴⁾⁵⁾。

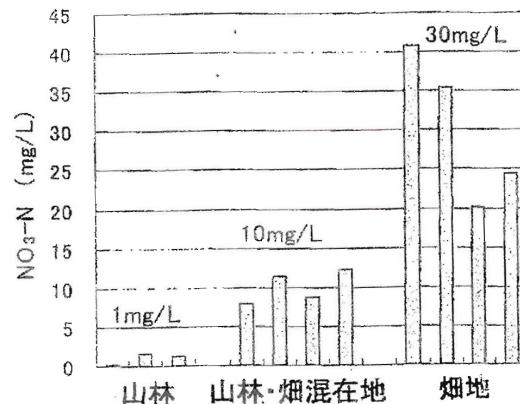


図 16-1 涵養域を異にする湧水の硝酸濃度¹⁾

印旛沼流域における湧水中硝酸態窒素濃度について、多くの機関で調査した 58 か所の結果をまとめると、図 6-2 のように⁶⁾⁷⁾、1mg/L 以下のところが最も多く、次いで 4~14mg/L のところが多くなっています。山林のような人の影響の少ない涵養域を持つ湧水が多い一方で、畑作などの人為的な窒素汚濁の影響のあるところが増えているためでしょう。

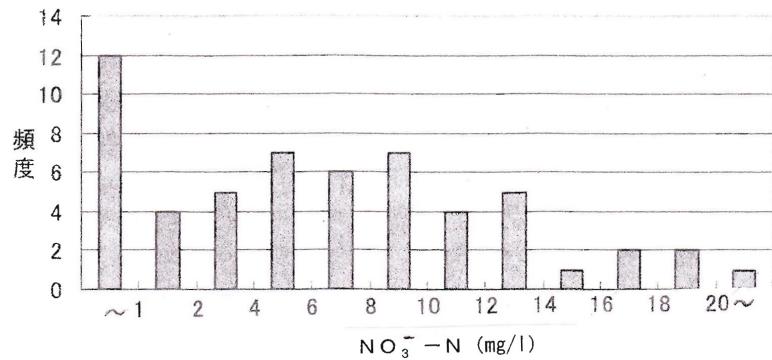


図 16-2 印旛沼流域における湧水中硝酸濃度の頻度分布⁶⁾⁷⁾

注) 今橋 (2000) 調査 25 地点、佐倉市 (2000) 調査 30 地点を合わせて作図

硝酸を含んだ土壤中の水が、地下水となり湧水となって流出するまでの時間は、地下の地質構造によって浸透速度を異にするために場所によって異なりますが、畠表層の実験などから数年ないし数十年を要するであろうと言われています。

3 谷津低地から印旛沼に流れ込むまで

酸素の多い酸化状態の台地で安定な硝酸態窒素 (NO_3^-) は、谷津低地の水田や湿地に流入すると、酸素のない還元状態のところで安定な形になりますとして化学変化します。

水田や湿地は、図 16-3 のように⁸⁾、空気を含む表面の水に接している薄い泥の層は酸化状態の層（酸化層）になっていますが、そのすぐ下層は微生物によって酸素が消費されて酸素のない還元状態の層（還元層）になっています。

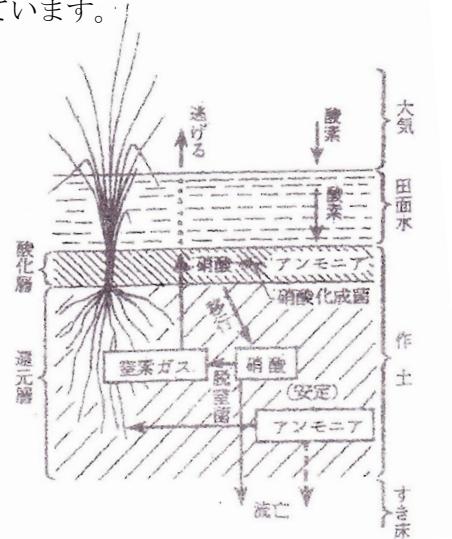


図 16-3 水田の脱窒作用⁸⁾

酸化層で安定な硝酸態窒素 (NO_3^-) は、マイナスイオンですから酸化層土壤に吸着されることなく水と一緒に下層の還元層に滲み込んでいきます。還元層では硝酸を還元する菌（脱窒菌）の作用によって硝酸は還元され、亜硝酸 (NO_2^-) を経て、窒素ガス (N_2) に変化します。窒素ガスは気体ですから水に溶けることなく大気中に揮散します。この一連の化学変化によって、硝酸態窒素は窒素ガスとなって大気中に放出され、その分だけ土壤中の窒素は減ります。この作用を脱窒作用と呼んでいます。

こうして、河川や湧水中的硝酸態窒素は谷津低湿地の泥層の中で脱窒作用を受けて減少

し、残った窒素が印旛沼に流れていきます。

なお、脱窒作用は、昭和 10 年代に、水田における硫安の効率的な施肥方法を研究する際に発見され、水田作土深層の還元層に直接硫安を施肥すれば水稻に効率よく吸収されるという新しい稻の施肥技術（深層施肥法）⁸⁾の元になりました。現在は、下水処理の窒素除去として、さらに自然界の湿地を活用した窒素汚濁対策として重要視されています。

[参考 10] 窒素の循環と化学

窒素は、以上のように、台地上の酸化状態、谷津低地の還元状態のところで、微生物の働きを媒介として化学変化を起こしながら環境中を移動しています。その概要をまとめると、図 16-4 の通りです。

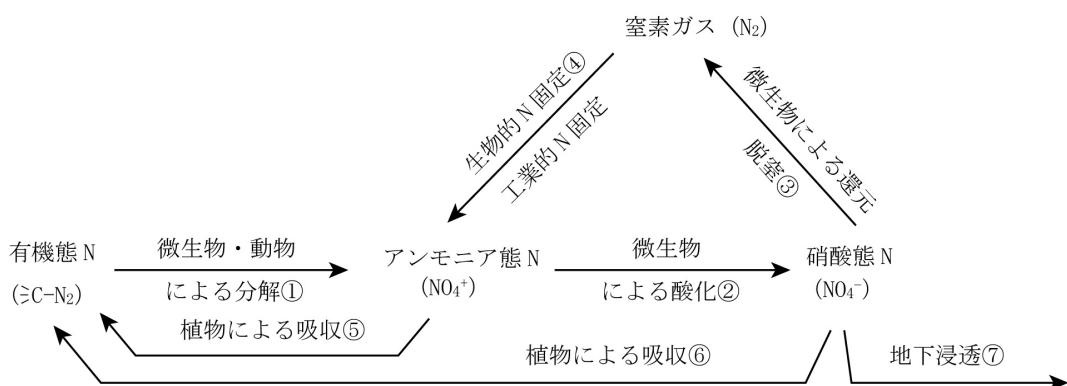


図 16-4 生物作用による窒素の循環

生物の体を構成する有機態の窒素化合物は、生物が死ぬと微生物などの働きによって大部分は無機態のアンモニア態窒素 (NH_4^+) に分解（図 16-4 の①反応）されます。アンモニア態窒素 (NH_4^+) は、空気（酸素 O_2 ）の多いところでは硝酸化成菌などの働きによって硝酸態窒素 (NO_3^-) に酸化（②反応）されます。アンモニア態窒素は土壤に吸着されますが、硝酸態窒素は吸着されないので、その一部は雨水浸透とともに地下に浸透して地下水に入り（⑦反応）、湧水として再び地上に出ることがあります。アンモニア態窒素 (NH_4^+) や硝酸態窒素 (NO_3^-) の一部は、植物に栄養として吸収（⑤⑥反応）され、再び植物体内で蛋白質などの有機物に合成されます。植物体は、枯れたり動物の餌になったりした後、また微生物によって分解（①反応）され、同様の循環を繰り返します。また、窒素の一部は微生物の分解を受けにくい腐植のような有機化合物になって土壤中に蓄積します。

水田や湿地のように水で空気 (O_2) から遮断された土壤は還元状態ですから、アンモニア態窒素 (NH_4^+) は安定していますが、硝酸態窒素 (NO_3^-) は脱窒菌の働きによって還元されて窒素ガス (N_2) になり（③反応）、大気中に放出されます。この作用を「脱窒作用」と呼んでいます。

また自然界では、脱窒作用とは逆に大気中の窒素ガス (N_2) を生物体内に取り込む「生物的窒素固定」（④反応）という現象があります。マメ科植物に寄生する根粒菌や湿地に生息する藍藻類の一種などは、生物的窒素固定をする生物の代表です。なお、窒素固定には、化学肥料製造工場などで、大気中の窒素ガス (N_2) をアンモニア (NH_4^+) に合成する「工業的窒素固定」があり、窒素肥料として農耕地に施されます。

地球は、大気と土壤の中に大量の窒素を貯蔵し、生物はその窒素を巧みに利用しながら、自己の生命維持のために懸命に動いている、と言ってよいでしょう。

窒素は、農作物にとっても水中のアオコにとっても重要な栄養素です。食糧生産をする農耕地には十分な窒素を与え、印旛沼には水質を悪くするアオコの発生を抑えるために、できるだけ窒素を少なくすることが求められています。この矛盾するような要求を満足させるために、以上のような窒素の複雑な動向を理解して、その場に応じた対処をしなければなりません。

4 リンの動向

リンは、植物にとって最も不足しやすい無機栄養素の一つです。印旛沼流域を構成する下総台地は火山灰土壌に覆われ、火山灰土壌は、特殊な粘土鉱物などの作用によってリンを強く吸収して不溶性にする性質を持っています。そのために下総台地は、リン肥料を十分に使用できる時代になるまで、畑作に適さない状態でした。現在は、リンの多量施肥によって、畑作は容易になり、野菜栽培が盛んに行われています。

汚濁発生源から流出したリンは、火山灰土壌に接触すると固定され、河川を流れる間に土砂中の粘土などの浮遊物質（SS）に取り込まれて水溶性リンは少なくなります。このことは河川水のリンを沈殿させて除去する効果と考えられますが、その分だけ河川水の浮遊物質（SS）はリンを含みやすくなります。印旛沼に流入する前に浮遊物質を沈殿させれば、リンの多くは除去されて印旛沼への流入量を減らすことができます。ただし、生活排水のように、土壌と接触する機会の少ない汚濁水中のリンは、火山灰土壌のリン吸着による除去作用を受けにくい状態になっています。

不溶性リン化合物はアオコなど植物の栄養として吸収されにくいけれども、強い還元状態のところでは植物に吸収されやすい水溶性リンに化学変化します。印旛沼の沼底にヘドロが溜まって強い還元状態になると、リンは水中に溶け出して内部生産 COD を増やすことになるので、底泥が著しい還元状態にならないように注意が必要です。

実は、リンは地球上の希少な資源です。リン肥料の原料となるリン鉱石は世界的に極端に不足し、世界の戦略物資の一つになっています。リンを水質汚濁物質とする位置づけから、貴重な有用資源として見直される時期も遠くないことでしょう。

文献

- 1) 真行寺孝・大塚英一、他 (2006) : 湧水中の $\delta^{15}\text{N}$ 及びイオン組成解析による下総台地の硝酸汚染の実態、千葉県農総セ研究報告書、5
- 2) 千葉県 (2004) : 主要農作物等施肥基準
- 3) 千葉県農業試験場 (1999) : 環境保全型農林業技術開発研究事業第1期（平成5～9年度）成果報告書
- 4) 千葉県農総研セ (2003) : 環境保全型農林業技術開発研究事業第II期研究成果集
- 5) 千葉県農林総研セ (2008) : 環境保全型農林業技術快活研究事業第III期研究成果集
- 6) 佐倉市 (2000) : 佐倉市自然環境調査報告書、地質環境部門
- 7) 今橋正征 (2002) : 佐倉市周辺湧水中硝酸態窒素と流域環境との関係、平成12～13年度科学研究費助成金成果報告書
- 8) 川口桂三郎 (1978) : 水田土壤学、講談社