

File No. 11

肥料と生態系の窒素循環

地球上に存在しているすべての物質は分解されていくと、元素に辿りつく。元素は単位ではほぼ一定の量を維持して、地球生態系という閉じられる枠の中で循環している。窒素 (nitrogen、N) も例外ではない。

窒素はすべてのタンパク質の構成要素で、窒素がなければタンパク質が出来ず、生命は存在しない。窒素は地殻中の存在度が約 20ppm であるが、大気には窒素ガスが約 78.08 % を占める。但し、大気中の窒素ガスは非常に安定し、植物や動物に直接利用されることができない。地球生態系では、不活性の窒素ガスを反応性の高い窒素化合物に変換して、動植物が利用可能な形態になるプロセスは次の 2 つがある。

1. **生物による窒素固定：** 一部の微生物が大気窒素を取り込み、体内で代謝を行い、有機窒素化合物を生成することができる。マメ科の根粒菌が有名な例である。
2. **雷の空中放電による窒素固定：** 雷が発生する際に空中放電のエネルギーで大気中の窒素が酸素と反応して窒素酸化物が生成され、さらに酸素により硝酸に酸化される。

生物による窒素固定は年間 1.8 億トン、雷等の自然放電による窒素固定は年間 0.4 億トンの窒素が動植物に利用できる形態に変換されると言われている。

植物は微生物が固定した窒素や物質循環の中から産生したアンモニウムイオン (NH_4^+) や亜硝酸イオン (NO_2^-)、硝酸イオン (NO_3^-) を吸収して代謝し、タンパク質やアミノ酸、核酸などの有機態窒素化合物を合成する。これを窒素同化という。

動物は植物や他の動物、微生物からタンパク質の形で窒素を摂取する。タンパク質は動物の体内でアミノ酸が代謝されると、不要な窒素代謝産物が発生する。これらの窒素代謝産物は尿素または尿酸という有機態窒素という形で体外に排泄する。

動物の排泄物や植物や動物の死骸は、土壤中の小動物や真菌、細菌などの微生物によって次第に分解され、その中に含まれていた有機態窒素が最終的には無機態のアンモニウムイオンに分解される。これ過程を**アンモニア化成**という。

アンモニア化成で生成したアンモニウムイオンは、さらに亜硝酸生成菌 (アンモニア酸化菌) によって亜硝酸イオンに酸化され、硝酸生成菌 (亜硝酸酸化菌) によって硝酸イオンに酸化されていく。この過程を**硝化作用**という。

このアンモニウムイオンや亜硝酸イオン、硝酸イオンは、再び植物に栄養素として利用される。また、アンモニウムイオンの一部は、アンモニアガスとして大気中に揮散される。

一方、亜硝酸イオン、硝酸イオンは嫌気的な環境下に於いて脱窒菌により、窒素分子 (N_2) や一酸化二窒素 (N_2O) 分子に還元され、窒素ガスとしては大気中に戻っていく。この過程を**脱窒**という。

アンモニアの人工合成方法が発明されていなかった文明時代以前は、地球生態系に発生する窒素循環は生物 (微生物、植物、動物) を中心にバランスの取れたものである。図 1 はその窒素循環を簡単に纏めたものである。但し、自然界における実際の窒素循環は非常

に複雑であることを忘れてはいけない。

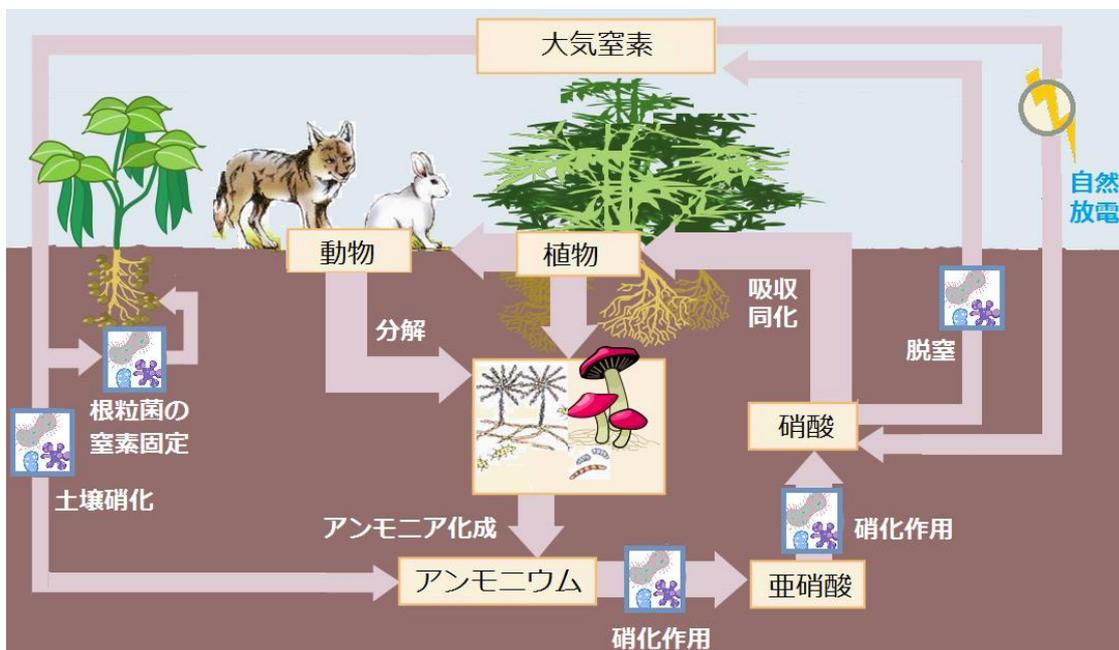


図 1. 自然状態の地球生態系の窒素循環

18 世紀にイギリスに始まった産業革命は人口増加と生活レベルの向上をもたらし、資源、食糧やエネルギーの需要が大幅に増えた。特に人口増に対応するにはより多くの食糧が必要で、家畜糞尿、堆肥などの従来のバイオマスだけを肥料とする自然栽培方式は到底無理である。肥料を製造するために窒素化合物が必要で、ヨーロッパ諸国に大気中の窒素ガスを原料としてアンモニア又は植物が利用可能な窒素化合物を合成する研究は盛んに行った。

1902 年に空中電弧法が K. Birkeland と S. Eyde によりノルウェーで工業化され、1905 年には石灰窒素法が A. Frank と N. Caro により工業化された。しかし両者は共に多量の電力を消費するので、生産原価が高く、増産にも限度があった。

ドイツのフリッツ・ハーバー (F. Haber) は窒素ガスからアンモニアを直接に合成する方法を発明した。1909 年 7 月には実験室プラントにより初めて液状アンモニアが製造できるようになった。その後、改良を重ね、ハーバー・ボッシュ法として確立され、ハーバーも 1918 年のノーベル化学賞を受賞した。

アンモニア合成法の開発以降、アンモニアから合成された硝安、硫安、尿素等の化学窒素肥料が農業に多量供給され、食糧生産量が大幅に増加し、急増した世界の人口に必要な食糧をほぼ満足的に供給できるようになった。現在、全人類が摂取するタンパク質中の窒素の 1/3 は、合成肥料に由来する窒素で賄われていると言われる。2010 年のデータでは、アンモニア合成量が 1.6 億トンに達し、その約 80% (1.3 億トン) が化学肥料用である。また、IFA (国際肥料工業会) の予測では 2019 年度には化学窒素肥料の需要量だけがアンモ

ニアに換算すると 1.45 億トンになる。すでに人工合成のアンモニアは地球の生態系に於いて最大の窒素固定源となっている。

化学肥料や合成された窒素系化合物は最終的に土壌や水圏に放出して、微生物の働きでアンモニウムイオンや硝酸イオンに分解され、脱窒により再び窒素ガスとして大気に戻っていき、窒素循環を完結する。

人工合成の化学肥料と窒素系化合物を含む地球生態系の窒素循環は図 2 に纏めた。

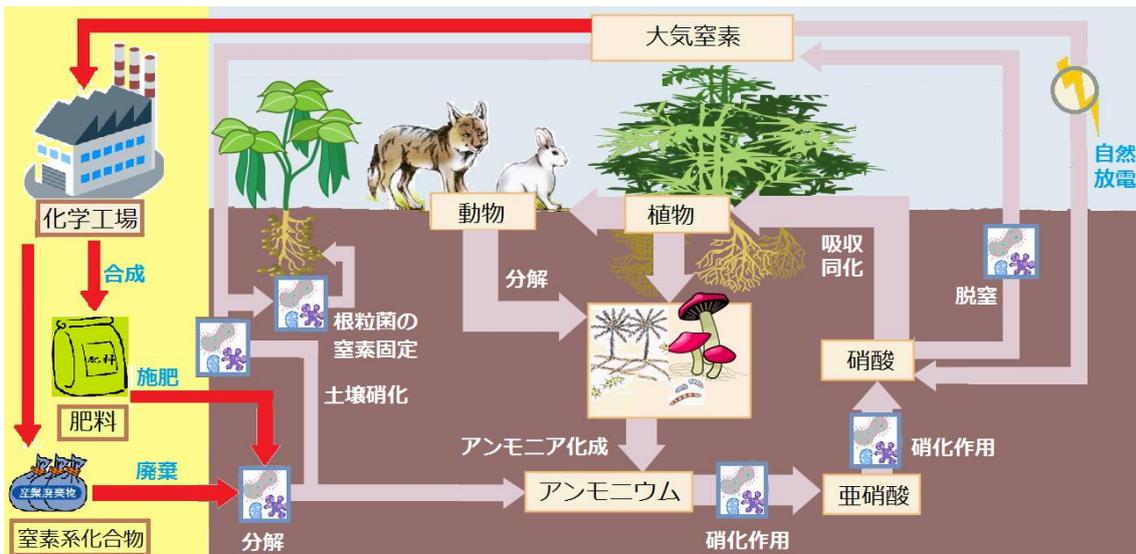


図 2. 化学肥料と窒素系化合物を含む地球生態系の窒素循環

農作物の収量に化学肥料の寄与度を調査する研究がいくつかある。古いデータではあるが、1965 年から 1980 年までアジア諸国の単位面積のコメ収量が 40%も増加したが、増産の諸要因の中には、肥料の寄与度が 25%に達したとの調査報告がある。

1970 年のノーベル平和賞を受賞したアメリカの農学者ノーマン・ボーローグ (Norman E. Borlaug) は、20 世紀の農業生産と発展に化学肥料が一番重要な役割を果たしていると述べた。20 世紀の初頭には世界人口約 16 億人、穀物生産量約 5 億トンであったが、20 世紀の終わり頃には人口が約 375%増の 60 億人に達したことに對して、穀物生産量が 400%増の 20 億トンになった。穀物生産量の増加分の 50%は化学肥料に依存するとも指摘した。

1990 年、アメリカの肥料学者 Robert G. Hoelt 教授は化学肥料が農産物の収量に与える影響に関する調査結果を発表し、アメリカ農産物の増産分の 50~60%は化学肥料によるもので、特に窒素系化学肥料が一番重要であると力説した。化学肥料を全く施用しない場合は、世界の農産物収穫量が 40~50%減少するだろうと指摘した。

また、国連の国際土壌肥沃度農業開発センター (IFDC) が 2006 年に発表した報告書には、肥料の施用不足により、アフリカの農地土壌が急速に養分を失いつつあり、75%の農地が著しく劣化している。人口増加で一層の食料が必要になるのに、この傾向が続けば今

後 15 年の間に作物収量が 30%も低下するだろうと報告した。

本来、生態系のプロセスによって大気から固定された窒素量と、有機態窒素が土壌微生物の分解により窒素ガスとして大気中に戻された量はほぼ均衡している。しかし、化学肥料の出現と施用、工業生産物の散逸・廃棄等といった人間活動により、土壌環境に大量の窒素が蓄積されている。特に化学肥料として施された窒素がどのくらい作物に摂取され、どのくらい土壌に残留されるかを推測するのは大変難しい。一般に植物による肥料中の窒素吸収率は、施肥量の 30~50%と言われている。

植物に吸収されず、土壌に残された窒素は時間と共にその形態を変化しながら、土壌から溶脱し、地下水、河川等を経て海へと流出し、その過程で湖沼や河川、海域の富栄養化、底層の貧酸素化、地下水の硝酸汚染を引き起こしているほか、大気中に放出された窒素酸化物は酸性雨の原因となり、さらに地球温暖化物質としても問題を引き起こしている。

地球上の窒素は動植物の生命活動を通じて生態系に循環しており、化学肥料の大量生産と施用が窒素循環に支障を生じることが否定できない。りん酸、加里も植物の必須元素であるが、窒素のように動植物の生命活動を通じて地球生態系に循環することが言い難い。従って、化学肥料の生産・施用が主に生態系の窒素循環に影響を及ぼすと言える。

言うまでもなく、生態系の維持と人類の存続の両立を解決するには、土壌中の養分供給能力と植物の生長に必要な養分量のバランスを最大限に考慮し、化学肥料を適切に施用することが大事である。