

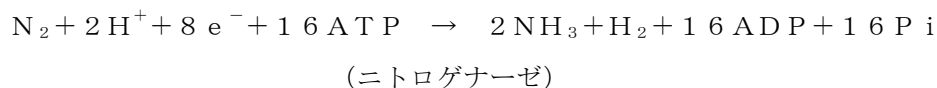
### 1. 窒素の循環

地球大気の78%を占める分子状窒素はほとんどの生物にとって利用不可能。

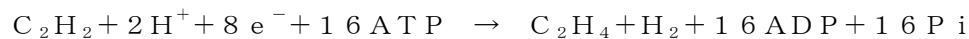
生物が利用できるのは「固定された窒素」である。生物によって固定される窒素の量 ( $13 \times 10^{10} \text{ kg} \cdot \text{yr}^{-1}$ ) は、工業や雷による非生物的な固定量 ( $5 \times 10^{10} \text{ kg} \cdot \text{yr}^{-1}$ ) の2倍以上あり、生物は大きな役割を担っている。

|         |  |                                  |
|---------|--|----------------------------------|
| 窒素固定    | $\text{N}_2 \rightarrow \text{NH}_3$               | ニトロゲナーゼ                          |
| 有機化     | $\text{NH}_3 \rightarrow \text{R-NH}_2$            | グルタミンシンテターゼ<br>グルタミン酸合成酵素        |
| 無機化     | $\text{R-NH}_2 \rightarrow \text{NH}_3$            | 脱アミノ酵素                           |
| 硝化      | $\text{NH}_3 \rightarrow \text{NO}_2^-$            | アンモニアモノオキシダーゼ<br>ヒドロキシルアミン酸化還元酵素 |
|         | $\text{NO}_2^- \rightarrow \text{NO}_3^-$          | 硝酸酸化還元酵素                         |
| 硝酸還元    | $\text{NO}_3^- \rightarrow \text{NH}_3$            | 硝酸還元酵素                           |
| 脱窒      | $\text{NO}_3^- \rightarrow \text{NO}_2^-$          | 硝酸酸化還元酵素                         |
|         | $\text{NO}_2^- \rightarrow \text{NO}$              | 亜硝酸還元酵素                          |
|         | $\text{NO} \rightarrow \text{N}_2\text{O}$         | 一酸化窒素還元酵素                        |
|         | $\text{N}_2\text{O} \rightarrow \text{N}_2$        | 亜酸化窒素還元酵素                        |
| アンモニア揮散 | $\text{NH}_4^+ \rightarrow \text{NH}_3$            |                                  |
| 雷による酸化  | $\text{N}_2 \rightarrow \text{NO}, \text{NO}_2$    |                                  |
| 水和      | $\text{NO}, \text{NO}_2 \rightarrow \text{NO}_3^-$ |                                  |

### 2. 窒素固定 (nitrogen fixation)



ニトロゲナーゼの基質特異性は低く、 $\text{N}_2$ 以外にもアセチレン、シアン、アジド等様々な3重結合化合物が還元を受ける。



ニトロゲナーゼは酸素の存在下では不安定なため、窒素固定菌は酸素に対する多様な保護機能を発達させている。

## 窒素固定菌の種類

全て真性細菌域あるいは古細菌域に属し、真核生物域での窒素固定は報告されていない。

### 1)共生窒素固定菌（全て好気性菌）

#### 根粒菌(Rhizobium, Bradyrhizobium, Azorhizobium)

プロテオバクテリア  $\alpha$  に属す

マメ科植物およびニレ科植物のParasponiaと共生

世界中で $250 \times 10^6$  haのマメ科植物が栽培され、平均 $140 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1}$ の窒素を固定

（世界の農耕地面積 $1406 \times 10^6$  ha、日本の農耕地面積 $5.1 \times 10^6$  ha）

#### 放線菌(Frankia)

グラム陽性細菌群に属す。

温帯・亜熱帯の多くの被子植物の科（ハンノキ、ヤシヤブシなど）に根粒を形成  
シアノバクテリア

地衣類、コケ類、シダ植物のアカウキクサ（Azolla）、裸子植物のソテツ科、  
被子植物のグンネラなどの広範囲の植物と共生する。

共生窒素固定では、窒素固定に必要なエネルギー源と炭素源は全て宿主植物から菌に供給されるため、

窒素固定能は一般に非共生窒素固定よりも高い。

### 2)非共生窒素固定菌(non-symbiotic nitrogen fixer)および共同窒素固定菌(associative .....

## 水田における窒素固定

根圏窒素固定菌群 (Pseudomonas, Alcaligenes 共同(Associative)窒素固定菌)

表層土壌中のシアノバクテリア（らんそう）

アカウキクサ(Azolla) - シアノバクテリア共生系

セスバニア(Sesbania) - 茎粒菌共生系

### 3. 有機化 (immobilization)

植物および独立栄養微生物の重要な機能

硝酸同化系およびアンモニア同化系酵素の働きによって、硝酸塩はアンモニウムイオンを  
経由してアミノ酸に変換される。

硝酸還元酵素(NR)

亜硝酸還元酵素(NiR)

グルタミンシンテターゼ(GS) グルタミン酸合成酵素(GOGAT)

#### 4. 無機化 (mineralization)

従属栄養微生物および通性独立栄養微生物 (有機栄養があれば従属栄養を行なえる生物)

微生物によるアミノ酸・核酸の加水分解、脱アミノ反応

アンモニア化成 (ammonification)

C/N比と有機態窒素の無機化量の関係

C/N 20以上の有機物では分解により無機化される窒素は微生物の増殖のために吸収利用され、土壤中にアンモニア窒素が放出されない。

さらには、作物と微生物の間に無機窒素の奪い合いが起こり、作物が一時的に窒素不足になる。→窒素飢餓 (nitrogen starvation)

#### 5. 硝化 (nitrification)

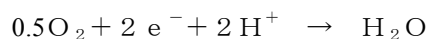
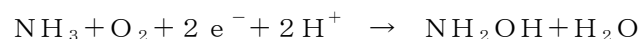
アンモニア酸化過程と亜硝酸酸化過程に大別できる。

##### (1) アンモニア酸化過程

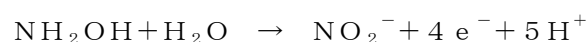
*Nitrosomonas europaea*, *Nitrosovibrio tenuis*, *Nitrosolobus multiformis*,

*Nitrospira briensis* など独立栄養菌プロテオバクテリアβに属するもの

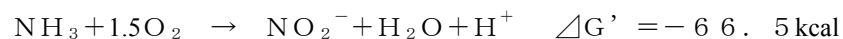
アンモニアモノオキシダーゼにより触媒される反応



ヒドロキシルアミン酸化還元酵素により触媒される反応



全体で



##### (2) 亜硝酸酸化過程

*Nitrobacter winogradskyi*, *Nitrobacter hamburgensis* など

独立栄養菌プロテオバクテリアαに属するもの

硝酸酸化還元酵素により触媒される反応



##### (3) アンモニアを直接硝酸に酸化できる細菌、糸状菌、酵母も知られている。

*Arthrobacter globiformis*, *Verticillium lecanii*, *Acremonium kiliense*, *Candida rugosa*, etc.

土壤中の硝化菌数は概して未耕地に少なく、耕地に多い。また、肥培管理や時期によってもかなり異なる。硝化作用の旺盛な畑土壌は健全な土壌であると考えられている。

自然界では、硝化菌と脱窒菌の共同作業で $\text{NH}_3$ による環境汚染の防止が行なわれている。

アンモニア酸化菌 *Nitrosomonas* は酸素の不足する条件下では $\text{N}_2\text{O}$ を生成する。 $\text{N}_2\text{O}$ は脱窒過程でも生成するが、オゾン層破壊の原因物質として知られている。

また、*Nitrobacter winogradskyi*の亜硝酸酸化還元酵素はpH 6以下の酸性条件下では、逆反応の $\text{NO}_3^-$ から $\text{NO}_2^-$ への還元の方を良く触媒する。すなわち、酸性条件下では、硝化ではなく脱窒の過程に関与することになる。従って、ハウス内などの閉鎖系においては土壌のpHが6以下になると不完全な硝化が起こり、 $\text{NO}_2^-$ の蓄積が起こる。

他方、硝酸塩はヒトの体内で亜硝酸に還元され、メトヘモグロビン症を起こすことがある。また、胃の中でアミン類と反応して発ガン性のニトロソアミンを作る可能性も指摘されている。近年、水質中および作物中の硝酸塩濃度の増加が著しく、懸念されている。

## 6. 脱窒 (denitrification)

真性細菌、古細菌、真核微生物にいたる広い範囲の微生物に脱窒能があり、土壌中に広く分布している。一般に未耕地よりも耕地に多い。水田では湛水土壌の表層部で硝化が起こり、生じた $\text{NO}_3^-$ が嫌気的な還元層に拡散して脱窒が起こる。また、根圏での脱窒能は非根圏の10～数十倍に達する。

脱窒細菌は通性嫌気性菌であるため最終電子受容体として窒素酸化物以外にも酸素を利用できるため、酸素の存在下では脱窒を行なわない。ただし、土壌は不均一であるため、土壌団粒内外における微小部位の還元状態や化合物の存在状態は大きくことなり、通気性の良い土壌中でも脱窒の起こることがある。

なお、土壌環境においてpHが低下すると、 $\text{N}_2\text{O}$ の段階で脱窒反応が停止し、脱窒ガスとして $\text{N}_2\text{O}$ の割合が増加する。

脱窒の意義 マイナス面 施肥窒素や地力窒素の消耗による作物生産力の減少

プラス面 地球陸上での窒素循環に貢献 脱窒がなければ地球表面の窒素の分布は海洋のみに偏ることになる。

環境中の硝酸塩の除去。水質の富栄養化の防止。

脱窒菌の種類