

File No. 65

緩効性肥料の仕組み

化学肥料の多くは水溶性で、施用した後、灌漑や降雨により水に溶けて、イオン状態となり、植物根に吸収されて初めて養分としての役割を果たす。有機肥料に比べて化学肥料は速効性があり、肥効が速く現れる最大の理由である。しかし、施用された化学肥料が短期間に一斉に溶け出すと、次の弊害をもたらす。

- 1. 肥料焼け：** 施肥後、土壌溶液中の養分濃度が急速に上昇し、あるレベル（閾値）を超えると、根が土壌から養水分を吸収するどころか、逆に根細胞内の水分が土壌に流出してしまう。酷い場合は細根などが死んでしまうだけでなく、地上部に養水分の供給ができなくなり、枯れることもある。
- 2. 水質汚染：** 施肥後、作物に吸収しきれない養分が雨水や灌漑水に連れられ、河川や地下水に流出してしまい、水質汚染の原因となっている。特に尿素や硝酸性窒素は土壌に吸着されず、簡単に流亡してしまう。2001年のデータではあるが、本邦の農地から年間流出された窒素量が約80万トン、中国がさらにひどく、年間約2,000万トンの窒素が農地から流出されたと推定される（資料1）。
- 3. 大気汚染：** 施用された窒素肥料が土壌微生物のアンモニア化成作用を受け、アンモニアガスとなって揮発し、大気中の硫黄酸化物（SO_x）と窒素酸化物（NO_x）と反応して、硫酸アンモニアと硝酸アンモニアのエアロゾル（aerosol）を生成して、PM_{2.5}粒子となる。中国研究機関の調査結果によれば、中国大気中のPM_{2.5}粒子は約50%が硫酸アンモニウムと硝酸アンモニウムのエアロゾルである。そのうち、農地から揮発されたアンモニアが生成されたエアロゾルがPM_{2.5}粒子の15～35%を占めると推定される（資料2）。

作物による肥料養分の吸収利用率は肥料種類と土壌の違いなど条件によって大きく変わるが、通常の化学肥料では、窒素で30～50%、りん酸で5～20%、加里で40～60%程度であるといわれる（資料3）。化学肥料から放出された養分は作物に吸収されない部分は無駄になるばかりでなく、環境汚染の元にもなる。

化学肥料の速効性を抑え、農作物の養分需要時期に合わせてゆっくり溶け出し、吸収されることは、施肥回数と施肥量を減らし、生産コストを下げるだけでなく、環境保全にも役立つ一石二鳥の効果がある。この考えに従い、1950年代緩効性肥料が開発された。

緩効性肥料（Slow release fertilizer または Delayed release fertilizer）とは、施用後肥料成分がゆっくり放出し、長く続くように工夫された肥料である。肥効調節型肥料とも呼ばれる。有機質肥料は肥料効果の発揮に微生物の分解が必要であるため、ほとんどが緩効性であるが、農業分野で緩効性肥料は化学的または物理的に加工された化学肥料を指す。詳しく言えば、理化学的手法を用いて肥料成分の溶解・溶出、分解を制御し、養分の吸収利用率を向上させることによって、肥料効果が改善される化学肥料のことである。

現時点では、緩効性肥料は主に窒素肥料と加里肥料、化成肥料に関するものである。りん酸肥料は可溶性や可溶性のものが多い上、土壌に蓄積する特性を有するため、理化学的

手法で緩効性を付与する必要性がほとんどない。

通常の化学肥料に比べ、緩効性肥料は肥料養分の吸収利用率を 10～30% 高める効果が認められる。しかし、緩効性肥料は生産コストが高く、使用に技術と経験も必要であるため、本邦では水稲と一部の野菜を除き、なかなか普及されていない。海外も同じ状況である。2015 年現在、化学肥料使用量のうち、緩効性肥料のシェアが推定で 1～2% しかなく、ほとんど先進国に集中している。

緩効性肥料はその加工方法、性能と仕組みにより生物的安定性肥料、化学的緩効性肥料と物理的緩効性肥料の三つに大別される。以下はそれぞれの仕組みについて説明する。

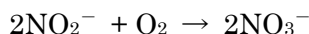
1. 生物的安定性肥料

生物的安定性肥料 (Biostable fertilizer) とは、尿素や硫安、硝安の窒素系化学肥料に特殊な殺菌効果のある薬品を添加して、土壤微生物の活動を抑え、窒素養分のアンモニア化成、硝酸化成及び脱窒を抑えることができる肥料のことである。現在、添加材として主にウレアーゼ抑制材と硝化抑制材が使用されている。

農地に施用された尿素はそのままでは作物の根に吸収されにくい。まず、土壤微生物により加水分解され、アンモニア性窒素の炭酸アンモニウムに変化する。この過程はアンモニア化成と呼ばれる。反応式は、

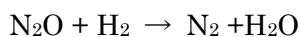
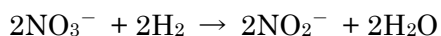


アンモニアが通気性の良い環境に於いて土壤微生物によりさらに亜硝酸を経由して硝酸に酸化される。この過程は硝酸化成 (硝化作用) と呼ばれる。反応式は、



尿素はほとんどアンモニア化成と硝化作用により生成されたアンモニア性窒素と硝酸性窒素の形で作物に吸収利用される。硫安と硝安はアンモニア性窒素状態のほか、硝酸化成を通して硝酸性窒素となって吸収利用される。なお、植物にとって硝酸性窒素が一番吸収利用されやすい形である。

しかし、陰イオンの硝酸性窒素が土壤粒子の持つマイナス電荷と互いに排斥するため、土壤に吸着せず、水と共に流亡しやすい。また、硝酸性窒素が嫌気的環境に於いてさらに土壤中の脱窒菌により亜硝酸→窒素分子にまで還元され、大気中に散逸してしまう。この過程は脱窒と呼ばれる。反応式は、



アンモニア化成は土壤微生物の持つウレアーゼ、アンモニアから亜硝酸への酸化は亜硝酸菌、亜硝酸から硝酸への酸化は硝酸菌が担っている。従って、これらの微生物の活性を抑えれば、窒素肥料の肥効を長く持続させ、流失と散逸を減らし、窒素利用率を高めることができる。

現在、生物的安定性肥料は主に窒素系化学肥料にウレアーゼ抑制材と硝化抑制材を添加する形で実現している。その仕組みは図 1 に示す。



図 1. 生物的安定性肥料の仕組み図

ウレアーゼ抑制材は主にヒドロキノン (HQ)、N-(n-ブチル) チオリン酸トリアミド (NBPT)、フェニルリン酸ジアミン (PPD) を使っている。一方、硝化抑制材はチオ尿素、ジシアンジアミド、ニトラピリンが多用される。

2. 化学的緩効性肥料

化学的緩効性肥料 (Controlled release fertilizer by chemical modification) は、肥料成分の溶解性を抑えるように化学的処理を施したものである。この種の肥料は水にほとんど溶けないが、施用後、土壤中加水分解反応や微生物による分解反応を受けてゆっくり尿素やアンモニアに転換され、水に溶けて肥料効果を発揮する。

現在、化学的緩効性肥料はウレアホルム、IB、CDU、グアニル尿素およびオキサミドの 5 種類がある。そのうちウレアホルムは 1955 年ドイツの BASF 社が商業生産を始めた最初の化学的緩効性肥料で、原料コストが安く、生産技術が成熟して、緩効性効果も良いため、現在も化学的緩効性窒素肥料の中に最大のシェアを占めている。

ウレアホルム (ホルム窒素、urea formaldehyde、UF) は、尿素とホルムアルデヒドが一定の条件下で縮合反応させて、合成されたものである。ウレアホルムはそのままの状態では植物に吸収利用されない。施用後、土壤中の微生物による加水分解を受けて次第に尿素を放出して、アンモニア化成、硝化作用を経てアンモニア性窒素や硝酸性窒素となって初めて植物に吸収利用される。その構造と分解の仕組みは図 2 に示す。

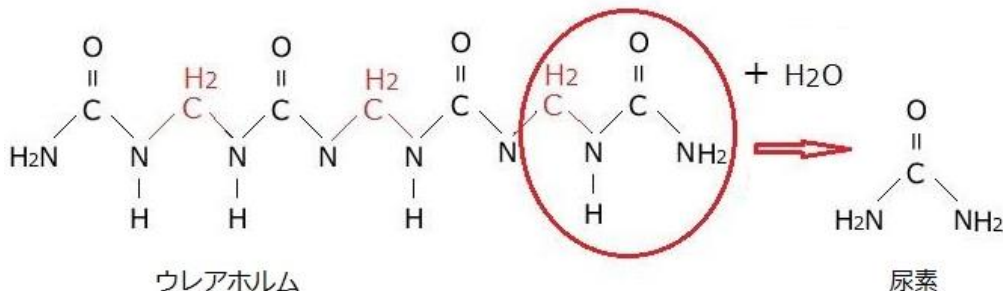


図 2. ウレアホルムの構造と加水分解の仕組み図

3. 物理的緩効性窒素肥料

物理的緩効性窒素肥料（Controlled release fertilizer by physical modification）は、主に球状の肥料粒子の表面を半透水性ないし非透水性膜物質で被覆加工したものである。肥料成分が被覆膜の微細な穴や亀裂を通じて徐々に溶出することにより、肥効が長く持続される。コーディング肥料（Coated fertilizer）とも呼ばれる。被覆材料の種類や被覆層の厚さによって肥料成分の溶出速度を論理的にコントロールできるため、植物の生育ステージに沿って必要だけの肥料成分と量を供給する理想的な緩効性肥料である。現在、樹脂コーディング肥料と硫黄コーディング肥料が主流である。

樹脂コーディング肥料は、肥料粒子表面を薄い非透水性の樹脂で被覆させるものである。肥料成分の溶出時期と速度を制御するため、樹脂材料にでん粉等の炭水化物、タルク、クレイ等の無機鉱物、エチレン・酢酸ビニル共重合体、エチレンビニルアルコール共重合体等の脂肪族ポリマーを溶出調節材として添加する。施用後、溶出調節材が水の浸漬により溶解または膨潤、崩壊して、樹脂被膜にピンホールを形成し、中にある肥料成分が溶解して溶出する。樹脂被覆肥料の構造と溶出過程は図 3 に示す。

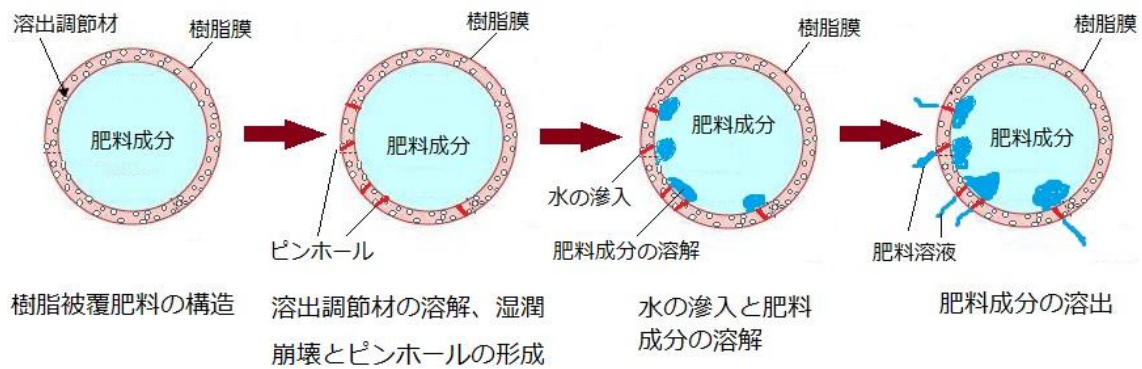


図 3. 樹脂被覆肥料の構造と溶出過程

硫黄被覆肥料は、溶融した硫黄を使って肥料粒子の表面を薄い硫黄層で被覆させるものである。肥料成分の溶出を制御するため、被覆後、硫黄層の上にもう 1 層の生分解性シール材（ワックスまたはポリウレタン）を被覆する。その構造と肥料成分の溶出仕組みは図 4 に示す。

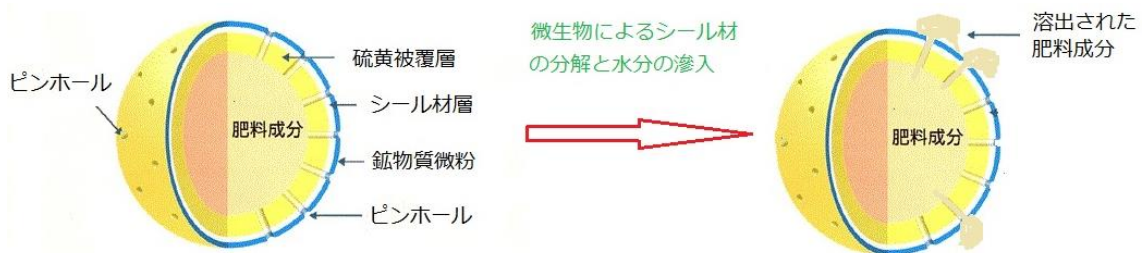


図 4. 硫黄被覆肥料の構造と仕組み

硫黄被覆肥料は施用後、土壤中では微生物によりシール材が徐々に分解され、水分が硫黄被覆層に生じた亀裂（ピンホール）から内部に滲入し、肥料成分をゆっくり溶出させる。肥料成分の溶出速度はシール材の分解速度とピンホールから水の滲入量により制御するので、水稲など水田作物には適しないが、畑作物には向いている。

硫黄は無機系物質で、植物の必須元素でもある。肥料成分が溶出した後の殻は粉々となり、微生物の働きおよび化学反応により硫酸イオン（ SO_4^{2-} ）に変化し、植物や微生物に吸収利用される。

被覆肥料の肥料成分溶出パターンはリニア型とシグモイド型に大別される。なお、どの溶出型に属するかは被覆材料と生産工程により決められる。

- ① リニア溶出型： 施用直後から徐々に溶出し、その累計溶出カーブはほぼ直線を描く。
- ② シグモイド溶出型： 施肥初期に溶出抑制期間（ラグ期）があり、ラグ期を過ぎてから溶出が開始し、その累計溶出カーブはS字型を描く。

それぞれの溶出型は図 5 に示す。

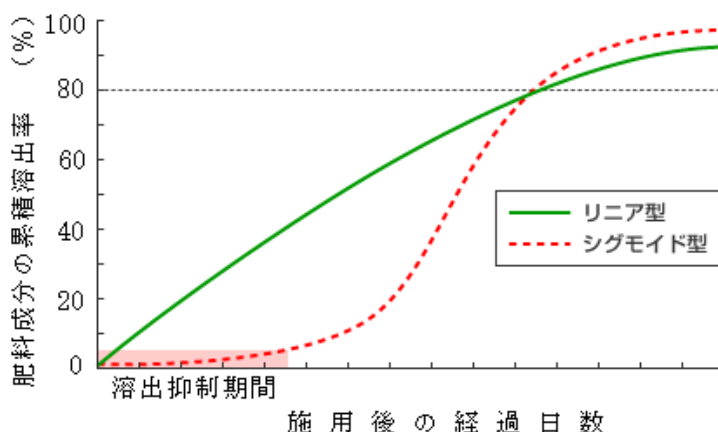


図 5. 被覆肥料の肥料成分溶出型

上記 3 種類の緩効性肥料のうち、養分溶出時期と溶出量を精密に制御できるのは物理的被覆肥料だけである。但し、生産コストが一番高いため、その普及のネックとなっている。

資料 1：(独) 農業環境技術研究所のプレスリリース (2009 年 8 月 18 日)

(<http://www.naro.affrc.go.jp/archive/niaes/techdoc/press/090818/press090818.html>)

資料 2：中国環境保護省環境と経済政策研究センター資料 (中国語)

(<http://www.prcee.org/article/content/view?id=254344>)

資料 3：日本大百科全書(ニッポニカ)、肥効率の解説

(<https://kotobank.jp/word/%E8%82%A5%E5%8A%B9%E7%8E%87-609571>)