

農業の地力維持と地下水汚染の防止

—その基本的な考え方—

武 部 隆

1 はじめに

本稿の目的は、農業の地力維持と地下水汚染の防止について、その基本的な考え方を提示することである。さて、環境と農業を問題にする場合、環境が農業に及ぼす影響と農業が環境に及ぼす影響の2つを考慮する必要がある。このうち、とくに後者については、農業が環境に及ぼすプラスの影響とマイナスの影響を区別することが大切である。近年、地球的規模での資源・環境問題が議論され、また消費者や市民団体が農産物の安全性や地下水汚染について発言する機会が多くなったが、これらは主として農業が環境に及ぼすマイナスの影響に着目してのことである。

農業が環境に及ぼすマイナスの影響のうち、本稿では地下水汚染の問題をとくに取り上げる。そして、地下水汚染をもたらすことなく地力維持をはかるその基本的な考え方を検討することにしよう。環境に悪影響を及ぼさないうちで農業の地力維持をはかり、しかも経済的にも存立していけるということは、非常に難しいことである。しかし、科学の発達にはすばらしいものがある。本稿では、農法変革を念頭におきながら、このような問題について考察することにしよう。

2 環境が農業に及ぼす影響

まず、環境が農業に及ぼす影響からみていこう。ここでは、環境が農業に及ぼす悪影響を中心にみることにする。環境が農業に及ぼす影響を原因別にみると、①大気汚染によるもの、②水質汚濁によるもの、③土壌汚染によるものがあるが、近年これらに加えて、④地球温暖化による影響が問題にされるようになってきた。

大気汚染による影響の例として、イオウ酸化物や塩素による農作物の被害をあげることができる。また、都市近郊の野菜が光化学オキシダントにより被害を受けることがあるが、これなども大気汚染が農業に及ぼす悪影響といえることができるであろう。

水質汚濁が農業に及ぼす悪影響は、比較的身近なところで生じている。農村のいっそうの混住化による家庭用排水の増大は、農業用水の富栄養化をもたらす。また洗剤に由来するリンの影響なども加わって、農作物の収量を減少させたり、品質を悪化させたり、あるいは生育を遅れさせたりして、農業・農作物に大きな被害を与えることになる。水質汚濁の汚染源

は、都市污水だけでなく、他にも鉱山や工場を汚染源とするものがある。カドミウムや銅が河川に流れ込み、それを灌漑用水として成長した農作物は、甚大な被害を受けることになるのである。

ところで、大気汚染や水質汚濁は、土壤を汚染させる大きな原因でもある。とくに水質汚濁の場合、それはたいてい土壤汚染をもたらす、長期間にわたって農業・農作物に悪影響を及ぼすことになる。汚染物質の直接土壤投棄や農業資材などが土壤を汚染させる原因となることは、述べるまでもない。農業の土壤汚染の問題は、農業資材が土壤を汚染させる典型的な例である。

地球の温暖化が農業に与える影響については、はっきりと断言できることは何もない。しかし、北半球の高緯度地域でプラスの影響が生じる他は、全体としてマイナスの影響が強そうということが予想されている。ここで、地球温暖化に関しては、農業は被害者であると同時に加害者でもあるという点が重要である。とくに水田は、温室効果ガスであるメタンや亜酸化窒素を多量に発生させるため、近年、環境論者のあいだで、注目をあびるようになってきたことは周知の通りである。

- 1) これについては、農業と経済臨時増刊『人間環境と農業』昭和51年、および農業と経済別冊『環境保全と農業』平成3年に詳しいので参照されたい。なかでも、前者のなかの増島博氏の論稿「農業生産環境の悪化とその対策」が非常に参考になる。

3 農業が環境に及ぼす影響

次に、農業が環境に及ぼす影響についてみることにしよう。農業が環境に及ぼす影響には、環境保全的なプラスの影響と環境破壊的なマイナスの影響が存在する。そこではじめに、農業が環境に及ぼすプラスの影響からみていくことにする²⁾。

第1に、農業には、水・土を保全するプラスの機能がある。水保全の機能として、水資源の涵養と地下水維持の機能、洪水防止の機能、それに水質浄化の機能がある。土保全の機能としては、土壤侵食防止（風食・水食の防止）の機能、汚染物質の浄化と分解の機能、それに土砂災害の防止の機能をあげることができる。

第2に、農業には、大気を保全するプラスの機能がある。大気の組成を改善し、大気を浄化し、気候を緩和し、また音を遮断するという機能である。しかし、一般的にあって、大気を保全する機能は、農業よりも森林においていっそう大きいといえることができる。

第3に、農業には、緑空間の維持というプラスの機能がある。景観を維持し、レクリエーション空間を提供し、そしてまた災害の際の避難地を提供するのである。居住の快適性を保証し、保健保養の場を提供することも、農業に与えられた重要な機能といえるべきである。

続いて、農業が環境に及ぼすマイナスの影響をみてみよう³⁾。これは、農業も環境破壊者で

あり、環境に対する加害者であるという認識の上に立っている。

農業が環境に及ぼすマイナスの影響としては、第1に地下水の汚染があり、そして第2に温室効果ガスの発生がある。地下水汚染の問題とは、硫安・尿素・硝安をはじめとする窒素質肥料の多用が、土のコロイドには保持されない陰イオンである硝酸態窒素 (NO_3^-) の地下水への流亡を増大させ、結果として地下水が硝酸で汚染され、人体に悪影響を与えるという問題であり、温室効果ガス発生の問題とは、窒素質肥料の多用が硝酸態窒素の脱窒を促し、温室効果ガスである亜酸化窒素を発生させ、また水田から、これも温室効果の強いメタンガスを多量に発生させるという問題である。

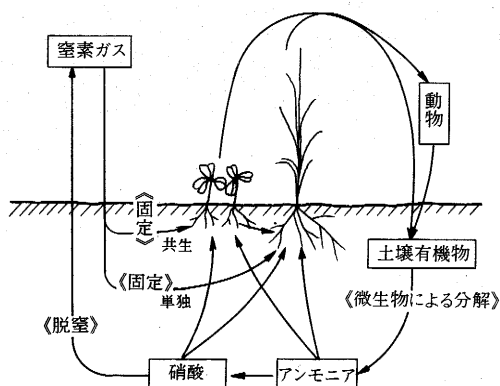
ここで、窒素質肥料の多用化は、近代農業の特徴であり、また農学の発展の1つの成果を示すものでもある。しかし、農業・農学の発展が環境を破壊しているとすれば、これは由々しき問題である。そこで、以下では、地下水汚染をもたらすことなく地力維持をはかり、また経済的にも成立しうる農法を念頭におきながら、そこにおける基本的な考え方を検討することにしよう。

- 2) これについては、たとえば、全中編『アグリ・レポート国民にとって農業とは』（昭和59年、家の光協会）に詳しい。
- 3) これについては、農業と経済別冊『環境保全と農業』平成3年に詳しいので参照されたい。

4 窒素循環にみる地力の維持

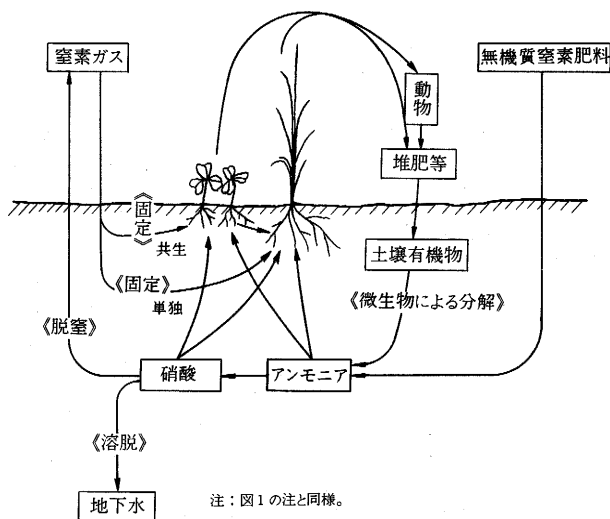
緑色植物は、太陽エネルギーを利用して、空気中の二酸化炭素と土壌から吸い上げる水とで炭水化物を合成し、またそれに土壌から吸収する窒素をはじめとする無機養分を加えて、蛋白質や脂肪など高エネルギー化合物を作り出す⁴⁾。無機養分には、窒素の他に、りん、カリウム、マグネシウム、カルシウム、いおう、鉄、ほう素、マンガン、銅、亜鉛、モリブデン、それに塩素などがあるが、これらの養分は、いずれも土中の水に溶けたイオンのかたちで根から吸収されるのである。ただし、豆科植物は、根粒菌のはたらきにより空気中の遊離窒素を化合態のかたちに固定することができ、根から吸い上げる無機養分の窒素に加えて、空気中の窒素をも植物体内に取り入れている。

いま、作物が根から吸収する養分としてきわめて大切な窒素を取り上げ、その窒素の循環を図示すると、図1のようになる。すなわち、動植物の残渣や死骸その他のかたちで、まず有機物が土にもどされる。この土壌有機物（腐植）は、有機態窒素のかたちをしているが、従属栄養微生物（生命維持に必要な炭素を他の有機物から取り入れる微生物）によって分解されてアンモニア態窒素 ($\text{NH}_4\text{-N}$) という無機態窒素に変換される。これは有機態窒素の無機化といわれ、①地温が高いほど、また②酸性土壌から中性土壌に近づくほど、従属栄養微生物の活動が活発となって、より多くのアンモニア態窒素が生成されるのである。



注：山根一郎『土と微生物と肥料のはたらき』(昭和63年，農文協)
 図4-3(44ページ)を参考にして作成した。

図1 窒素の循環 (1)



注：図1の注と同様。

図2 窒素の循環 (2)

このアンモニア態窒素は、酸素を必要とする好気性の独立栄養細菌（生命維持に必要な炭素を空気中の二酸化炭素から取り入れる細菌）である亜硝酸菌によって酸化され亜硝酸態窒素 ($\text{NO}_2\text{-N}$) に、さらに、これも好気性の独立栄養細菌である硝酸菌によって酸化され硝酸態窒素 ($\text{NO}_3\text{-N}$) にまで変換される。作物が根から吸収する養分としての窒素は、アンモニア態窒素（イオン表示では NH_4^+ ）か硝酸態窒素（同 NO_3^- ）であるので、土壤中にアンモニウムイオンや硝酸イオンが多く保持されているほど、一般には地力が高いことになる。

この硝酸態窒素は、土壤が還元状態になると、脱窒細菌（硝酸還元細菌）によって還元され、窒素ガスや亜酸化窒素ガス (NO_2) となって空中に逃げってしまう。この現象は、脱窒とよばれ、湛水時に土壤が還元状態を呈する水田においてよくみられる現象である。

豆科植物は、好気性細菌である根粒菌との共生により空中窒素を固定することができたが、微生物のなかには、単独で空中窒素を固定するアゾトバクターなどの細菌や、他にもノストックなどのランソウ類が存在していて空中窒素を固定している。このような窒素固定微生物は、固定した窒素を土のなかに放出し、土中の窒素養分をそれだけ豊かにしているのである。

さて、図1の窒素循環は、1つの封鎖系を形成しており、窒素養分の地力維持という観点からみても、1つの均衡システムをかたちづくっている。しかし、それは、無機質肥料を施用しない、いわば自然界の窒素循環とでもいうべきものである。現実の作物生産の場における窒素循環は、図1のようなものではない。少しく修正を施す必要があるのである。図2がそれである。

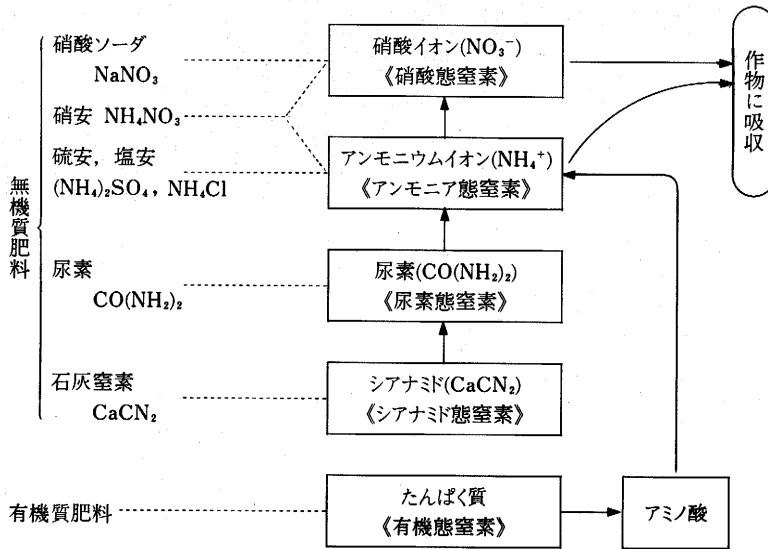
図1との大きな違いは、無機質窒素肥料の多用とそれにとまって生じるアンモニア態窒素・硝酸態窒素の落ち着き先の異なる点である。①雨の比較的多い畑地と、②雨の比較的不多い畑地、それに③水田の場合の3つのケースを想定し、節を改めてこれに関する若干の検討を試みよう。

- 4) 本節および次節の説述は、その多くを、山根一郎『土と微生物と肥料のはたらき』（昭和63年、農文協）、同『地形と耕地の基礎知識』（昭和60年、農文協）、三井進午『新版土と肥料』（昭和46年、博友社）、それに西尾道徳『土壤微生物の基礎知識』（昭和64年、農文協）に負っていることをお断わりしておかなければならない。

5 地力維持と化学肥料の施用

雨の比較的多い畑地では、無機質窒素肥料が多用されると、根に吸収されなかった硝酸態窒素は、一部は孔隙（液相と気相からなる）内の毛管水（有効水）として残るものの、大部分は重力水（過剰水）のなかに溶け込み地下水へと流亡していく。しかも、硝酸態窒素は陰イオンであって土のコロイドに保持されることはないため、この傾向はいつそう強くなる。土のコロイドに保持されるのは、陽イオンなのである。

いま、施用される窒素質肥料を無機質肥料と有機質肥料に分け、それら窒素質肥料の土中における変化を示すと図3のようになる。ここで、尿素と石灰窒素は炭素を含むため厳密には有機質肥料であるが、慣行に従って無機質肥料のなかに入れておく。同図にみるように、作物に吸収されるのはアンモニウムイオンと硝酸イオンである。アンモニウムイオンは水に溶けやすく、きわめてすみやかに作物に吸収される。また陽イオンであるため土のコロイドにも保持され、流亡することも少ない。しかし、アンモニア態窒素は、畑地にあっては、硝酸化成細菌（亜硝酸菌と硝酸菌をいう）によって容易に硝酸態窒素に変換される。硝酸化成細菌の作用を受けて形成された硝酸イオンも水に溶けやすく、きわめてすみやかに作物に吸収される。ところが、これは陰イオンであるため土のコロイドに保持されることはない。作



注：山根一郎「土と微生物と肥料のはたらき」(昭和63年，農文協)
図9-1(87ページ)を参考にして作成した。

図3 窒素質肥料の土中における変化

物に吸収されなかった硝酸態窒素は、地下水へと溶脱していく可能性が高くなるのである。

結局、無機質窒素肥料であれ有機質窒素肥料であれ、また土壌有機物であれ、畑地では図2・図3にみるように最終的に硝酸態窒素のかたちになってしまう。したがって、根に吸収されることのない余分な硝酸態窒素は、重力水のなかに溶け込み地下水へと流亡していく。雨の多い畑地ほど硝酸態窒素の溶脱が多いのは、以上の理由に基づいている。

雨の比較的少ない畑地では、状況はいくぶん違ったものになる。何よりも、硝酸態窒素の地下水への溶脱が、雨の多い畑地と比較して少なくなるという点が重要である。雨の比較的少ない地域の畑地においては、毛管水が適度に保持され、重力水は当然少なくなるため、結果として硝酸態窒素の地下水への流亡が抑えられるのである。雨の多い日本の畑地でアンモニア態窒素のかたちをした窒素質肥料が多用され、雨の比較的少ない欧米各国の畑地で硝酸態窒素のかたちをした窒素質肥料が多く用いられるのは、このような背景があつてのことである。

施肥効果という観点に立つと、雨の比較的少ない畑地の施肥効率は、雨の比較的多い畑地におけるそれより、一般的にいって効率がよいということになる。欧米より日本の畑地において単位面積当り施肥量が多いのは、このようなことも一因していると考えてよい。

ところで、水田の場合のアンモニア態窒素・硝酸態窒素の落ち着き先は、畑地とはおよそ異なったものになる。畑地の作土は酸化層だけから成るのに対して、水田の作土は酸化層と還元層の2層に分化しているからである。湛水により水田作土の下層には酸素が十分に行きわたらない。酸化物の酸素はつねに奪い取られる環境下、すなわち還元的な系の下におかれ

ているのである。したがって、下層の還元層に移動してきた硝酸態窒素は、脱窒細菌（硝酸還元細菌）の作用によって還元され、水に溶けない窒素ガスや亜酸化窒素ガスとなって大気中に逃げてしまう。これは脱窒現象とよばれ、還元層をもつ水田に特有の現象である。この場合、硝酸態窒素の地下水への溶脱は、畑作などと比べるとはるかに少なくなってくる。

還元状態で生じる反応は、脱窒現象だけではない。一般に、還元状態で安定な物質は酸化状態で安定な物質より酸性の度合いが弱いから、還元層をもつ水田土壌の pH は中性近くにまで上昇する。土壌が酸性になると、まず、①土中に大量に含まれているアルミニウムが活性化し、アルミニウムイオンが直接作物に害を与えたり、りん欠乏症を起こさせたりする。加えて、土壌が酸性になると、②カルシウム・マグネシウム・カリウムなどの養分が欠乏する。さらには、③微生物のはたらきが低下してしまう。このことからすると、pH が中性付近に落ち着く水田は、稲の生育にとってきわめて好都合な土壌環境を提供しているといえることができるのである。

しかし、不利な点もある。水田では、硫酸イオン (SO_4^{2-}) の還元物である硫化水素 (H_2S) が発生しやすい。この硫化水素が作物の根をいためるのである。硫化水素は鉄と結びつき不溶性の硫化鉄 (FeS) となるので、鉄分の多い土壌ならこの心配は無用である。だが、鉄分の少ない土壌の場合、硫化水素の発生が秋落ちの原因を作ることにもなってくる。

現実の作物生産における窒素循環は、以上のようなものである。窒素養分にかかわる高レベルでの地力維持が、窒素質肥料の多量施用により可能となっていることを確認することができるのである。

6 む す び

問題は、地下水汚染をもたらすことなく地力維持をはかり、しかも経済的にも存立しうる作物生産が実現可能かという点である。そこで、最後に、雨の比較的多い畑作地域をイメージしながら、これに関する基本的な考え方を提示することにしよう。

理屈は簡単である。根に吸収されずに地下水へと溶脱していく硝酸態窒素をなくしてしまえば、それでよいわけである。しかし、農業経営の現場でこれを実行することは、いまの生産技術を前提にすると、実に困難である。

第1に、吸肥特性が各作物間で違っていて、作物によっては、吸収養分量に対して供給養分量（とくに施肥量）を多くしないと十分な生育が得られないということがある。少ない施肥量で土壌の養分溶液濃度を高める方法、たとえば局所施肥のような施肥法が開発されなければならないのである。このことは、作物別に肥料削減技術を開発し、効率的な施肥方法を見つけ出す必要のあることを意味している。試験研究の成果に期待されるところが大きいのである。

第2に、個別作物ごとの対応に加えて、クリーニング・クロップを取り入れた輪作体系の

確立をはかる必要があるが、この輪作が、土性差・地域差、極端に言えば地片ごとに異なっていて、その確立はそれほど容易ではないということがある。輪作は、効率的な施肥方法を可能とし、したがって地下水汚染の防止に有効となるだけでなく、土壌のもつ種々の機能が輪作により総合的に生かされ、病害虫に対する抵抗性ができたり、連作障害が回避されたりして、各種のメリットを生み出すことができる。今後、輪作に関する試験研究が期待される所以である。

第3に、溶脱しにくい肥料の開発が求められるが、このような観点からの肥料製造は、緒についたばかりであるという現実がある。たとえば、硝酸化成抑制剤入肥料というものがある。これは、アンモニア態窒素が硝酸態窒素に変換するスピードを抑えることを狙っている。肥料メーカーに対しても、研究開発が期待されるのである。

最後に第4に、経済的な問題が存在する。たとえ、作物別の肥料削減技術が開発され、輪作による肥料の効率の利用が技術的に可能になったとしても、また、溶脱しにくい肥料が開発されたとしても、農業経営の純収益が低下してしまうようでは、新技術の定着はおぼつかない。法的規制や行政指導に頼らないのであれば、経営純収益を高める方向での技術開発がなされなければならないのである。

以上、基本的な考え方を4点にわたって述べた⁵⁾。地下水汚染をもたらすことなく地力維持をはかり、しかも経済的にも成立していけるということは、まことに難しいことである。しかし、科学技術の発達は、不可能とされてきたことを可能としてきたのである。経営純収益を高めながら、かつ地下水をも汚染しない農業経営を実現していくことは、以上の4点を克服することにかかっていると見えるのではなかろうか。

5) このような考え方は、すでに小川吉雄「畑作地域における地下水汚染と農法転換の可能性」(農業と経済別冊『環境保全と農業』平成3年所収)にみられるので参照されたい。