

硫 黄

(1) 土壤硫黄の動的な捉え方の必要性

硫黄は土壤中有機態硫黄と無機態硫黄の形で存在する。植物栄養的には無機態硫黄が重要であり、これは好気的条件下で安定な形態だが、全硫黄中に占める割合は少ない。一般に95%以上は有機態硫黄とされ、これは表層土に多い。しかし、有機態硫黄も潜在的には植物に可給化される。

このような静的な分け方による理解以外に動的な理解、すなわち植物に可給化される硫黄が土壤水分あるいは地下水に無機態として溶存し、また、根を通じて可給化される様相が土性によって異なるという観点も重要になってきた。硫酸根は溶脱しやすく、粗粒質土壤では多雨によって作物の硫黄欠乏が生じやすいというのがこれまでの常識であったが、大気からの供給が着実に減少しつつある国々、特に欧州では、これまで硫黄欠乏など考えられもしなかった作物で硫黄欠乏が顕在化している。また、わが国でも、副成分としての硫黄含量が少ない資材が奨励、連用された結果、水田土壤の特質も加わって、水稻の初期生育で硫黄欠乏が頻発するような事態が発生していることも事実である(辻, 2002)。

硫黄に対する従来の知見を新たな観点から見直すため、本稿ではクルーパー学術出版社が1998年に出版したエヴァルド・シュナッグ編、『農業生態系における硫黄』の多くを翻訳・引用した。また、本稿の記載文中の細部にわたる引用文献は、同書に記載されているので割愛した。

(2) 土壤有機態硫黄

土壤中有機態硫黄は土壤生物、植物遺体の部分的なもの、動物あるいは微生物残渣など異種の混合物からなる

が、これらの化学組成はよくわかっていない。これまで同定されたものには、含硫アミノ酸のシステインとメチオニン、硫酸コリン、スルフォリピッド、スルホン酸、多糖類硫酸エステルがある。

土壤有機態硫黄の分別

自然界の有機硫黄化合物と同様に土壤にも多種類の化合物があり、土壤硫黄の給源も経験の実験法で分別されている。おおよその知見と成果を紹介したい。

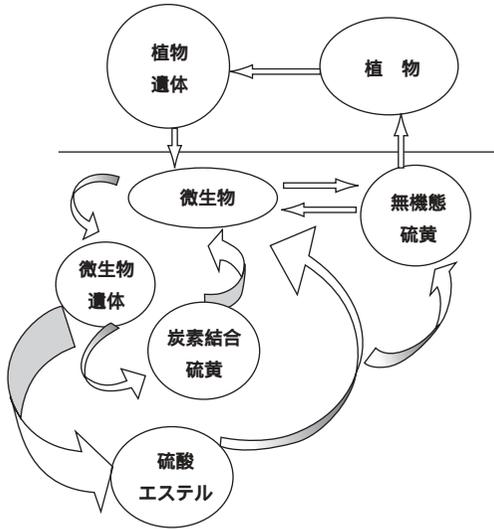
有機態硫黄を化学的に分別する伝統的な方法は還元剤(ヨウ化水素酸)との反応性を利用するものである。これらには、1)炭素と直接結びつく化合物の含硫アミノ酸、メルカプタン、二硫化物、スルホン、スルホン酸があり、これまでの成果によると、わが国の火山灰土壤では全硫黄中5~6割を占める(第1表)。また、2)炭素原子と直接結合しない硫酸エステル(C-O-S)があつて、これはヨウ化水素酸で還元される部分である。わが国の火山灰土壤では全硫黄中3~4割を占めている(第1表)。

一方、有機物のかんりの部分は土壤鉱物と密接な関連があるために、土壤有機物の分布や動態研究の場面では土壤あるいは土壤有機物を粒径別に分別する方法がとられる。しかし、硫黄は炭素、窒素と同様に粘土中にかなり濃縮していることがわかっているものの、土壤の粒径別画分における硫黄の分布はあまり知られていない。

第1表 火山灰土壤の形態別硫黄含量と組成割合 (辻, 1986)

形 態	硫黄含量 (ppm)		組成割合 (%)	
	粗粒質土壤	中・細粒質土壤	粗粒質土壤	中・細粒質土壤
全硫黄	713	1,007	-	-
無機態硫黄	38	156	5	15
有機態硫黄	675	851	95	85
HI 還元部分	252	339	37	33
炭素結合部分	411	481	56	49

注 有機態硫黄のHI(ヨウ化水素酸)還元部分と炭素結合部分の合計が全有機態に満たない理由は、無機態として抽出した画分中に溶解した腐植中の少量の有機態硫黄が含まれないため
粗粒質土壤および中・細粒質土壤はそれぞれ典型的な8種の火山灰土壤を供試し、平均値で示す
硫黄含量はいずれも元素(S)表示



第1図 土壌 植物系の炭素、硫黄循環の相互関係 (マックギル・コウル, 1981)

硫黄と粘土との関連性は強く、硫黄が易分解性有機物を微生物的な分解から防御するため、その関連性は炭素、窒素以上に重要とされる。硫酸エステルは有機態硫黄のもっとも不安定な形態であるが、ある土壌では粒径が細くなるほど硫酸エステルの割合が増える。このことは、有機態硫黄と粘土の相互関連性が有機態硫黄を無機化から防御する主要な機作であることを示している。しかし、さらに研究を要することとされる。

土壌中有機硫黄化合物の無機化

土壌中での硫黄の無機化、生物固定、酸化と還元のような転移反応には主に微生物を媒介とした過程が関与している。したがって温度、水分、pH、基質の多少というような微生物活性に影響する要因がこれらの過程に影響してくる。これらの過程において、好気的な農地土壌で重要なことは、無機態、つまり植物に有効な硫酸根が有機物から解放されることである。無機化と生物固定とは同時に起きるので、無機態硫黄が解放あるいは取り込まれるかは、これら過程の差し引きになる。第1図に土壌 植物系における炭素、硫黄循環の相互関係を模式的に示した。

土壌有機物を介する硫黄の無機化過程には生

物的無機化および生物化学的無機化の二つのタイプがある。生物的無機化とは、微生物がエネルギーを得るために必要な有機炭素が酸化されて炭酸ガスとなる際に、副産物として硫酸根を解放することである。また、生物化学的無機化とは、酵素の加水分解によって硫酸エステルのプールから硫酸根が解放されることである。第1図で示したとおり、炭素結合の硫黄 (C-S) の無機化は完全に微生物活性に依存するのに対して、硫酸エステルの硫黄 (C-O-S) は土壌中の酵素、スルファターゼによって容易に加水分解される。したがって生物化学的無機化はエネルギーの必要性よりも硫黄の供給に制限される。土壌の無機態硫黄が微生物的要求量に満たない場合、スルファターゼが硫酸エステルを加水分解するために使われ、逆に土壌中の硫酸根濃度が高いと生物的無機化は阻害される。

従来、無機化される窒素と硫黄の比率は、有機物中の硫黄 (S) と窒素 (N) が密接な関係にあることから土壌有機物中の比率と同じになるものと考えられていた。しかし、この説はかなりの変異を示した多くの研究と矛盾するもので、無機化されたもののN/S比が土壌有機物のN/S比よりも大きいあるいは小さい結果が示されるようになった。これは上述の硫黄に対する二つの無機化メカニズムから考えて特に驚くことではない。炭素結合の硫黄と窒素がともに安定して生物的無機化を通じて無機化されるのに対して、硫酸エステルは独立して無機化される。このように硫黄の正味の無機化は二つの反応速度や無機化される材料のN/S比に依存して当然変わってくるのだらう。

土壌有機硫黄の多くは酵素の加水分解によって無機化される硫酸エステルなので、本酵素への関心は高い。酵素の給源はカビ、バクテリア主体だが、植物根や哺乳類の尿などにも含まれている。スルファターゼは加水分解する硫酸エステルによって分類され、主要なグループにはアリル、アルキル、ステロイド、グルコ、コンドロ、ミコスルファターゼがあるが、土壌中ではアリルスルファターゼしか測定されていない。文献では硫黄の無機化とアリルスルファターゼ

活性との相関は高いことが示されてはいるが、これは一般的な酵素活性に影響される要因なのかもしれない。多くの酵素のなかでアシルスルファターゼのみが無機化に関与するという点では、硫黄の無機化の変異が説明できない。スルファターゼの基質特異性は不明であり、土壌中のアシルスルファターゼ活性が硫酸エステルの加水分解速度を制限する因子でもなさそうである。

短期と長期の無機化過程

さて、無機化される硫黄の給源は何なのか？ここで短期と長期の無機化過程を区別しておく必要がある。短期的には硫酸エステル貯留分が硫黄の解放に主要な役割を演じ、長期的には炭素結合の硫黄が無機化にとって重要である。有機態硫黄は新たに形成されたものから無機化されていくこと、硫酸根が最初に取り込まれるのは硫酸エステルの形態であることから、これが短期の給源になる。しかし、硫黄の循環時間が経過するに従い硫酸エステルは炭素結合部分に再配分されていくようである。

有機の形態から硫酸根として解放される無機化は長期にわたる実験では測定されていない。無機態硫黄は溶脱、植物吸収あるいは肥料施用などによって絶えず変わるので、長期にわたる真の正味の無機化量は有機態硫黄の含量から測定される。栽培によって無機化される硫黄はほとんど炭素結合部分に由来するようであり、また、肥料からの無機態硫黄が長期にわたって有機態に集積するのも炭素結合の形態のようである。

硫酸エステルは粘土に連係して物理的に保護されたものから可溶性のものまで広範囲な有機化合物から構成され、長期にわたる安定性は粘土あるいは高分子化合物との連係によるものとされる。

インキュベーション法によって土壌有機硫黄から硫黄の無機化がポテンシャルを数式化するモデルが推定されているが、実験方法によって変異が大きいので評価が難しい。無機化の機構はいくつかの基質や生化学的経路あるいは微生物群からなり、均一な潜在的無機化の貯留を想定

することは困難である。また、温度変化にも影響されやすいので、土壌中の真の無機化を測定するには圃場条件によるのが最良の方法であろう。そのような条件でも無機化による植物への硫黄の供給は年間1g当たりの土壌で3~7 μ gと少なく、土壌間の変異も小さい。

土壌の有機態硫黄の無機化は耕うん作業、作物残渣の還元、有機廃棄物（厩肥、下水スラッジ）による土壌改良のような管理法によっても影響されるが、耕うんによる季節的な変化は不明である。プラウ耕、同わらマルチあるいは不耕起の小麦作を試験処理したが無機化への影響はみられず、その後に休閑して不耕起にすると耕起よりも硫酸根が増加したという報告はある。土壌に有機物を施用するとC/S比に影響され、比率が200以下では硫酸根が有機物から解放され、400以上では固定、200~400では無機化と取込みの両方が生じる。わら中の硫黄含量は0.15%を超えないと十分なわらの分解速度が得られず、このときのC/S比は270といわれる。厩肥やある種植物材料のC/S比は比較的高く、土壌へ還元して数週間後は取込みによって土壌中の硫酸根の水準が下がることも知られている。

土壌有機硫黄のバイオマス

土壌養分の循環過程で、微生物バイオマス（土壌微生物の全体量）は物質循環の担い手として重要な働きをする。バイオマス硫黄はバイオマス炭素と同様にクロロフォルム燻蒸の後に抽出される。バイオマス硫黄は土壌中の有機態硫黄のごく小部分であり、全有機態硫黄に対して農耕地では0.9~2.6%、広葉樹、針葉樹林では2.2~1.2%にすぎない。

バイオマス炭素とバイオマス硫黄の比率は、土壌中の全有機物の炭素(C)、硫黄(S)比率よりもかなり低い。細菌あるいは放線菌のC/S比はカビのそれより半分以下で、カビの無機化速度は遅いためにC/S比の変動は少ないものと推定されている。カビは細胞内に硫酸コリンのような硫酸エステルを蓄えるので、硫酸エステルとして存在する硫黄の全硫黄に占める割合は細菌よりも高くなる。カビ組織中の硫黄濃度が培地の硫黄濃度に反応するのに対して、細菌組

織では硫黄に反応がないことからもうかがえる。

バイオマス硫黄の変動は土壌中の硫酸根の水準に連動する。バイオマス硫黄が植物に有効となるのはバイオマスが減少する期間であり、バイオマスが増加する間に硫酸根は固定されるようだ。しかし、硫黄が微生物バイオマスによって一度固定されると、これは土壌有機態硫黄に直接転移していくので、再度無機化されるまでは植物に有効とならない。バイオマス硫黄の大きさよりも、微生物集合体の活性が代謝回転速度に影響してくる。農地土壌では硫黄の無機化と微生物活性との間に高い相関が得られ、森林土壌では有機態硫黄の形成とATP（アデノシン三リン酸）含量との間に有意な相関が得られている。

(3) 土壌無機態硫黄

遊離の硫黄

硫黄原子は酸化数 - 2 価の硫化物から + 6 価の硫酸根まで変化する。農耕地土壌で好気的条件下の場合、優勢で安定な形態の無機態硫黄は硫酸根であり、低い酸化条件下では無視できる量の化合物しか存在しない。還元状態の水田では硫化物となる。したがって、硫酸根はしばしば無機態硫黄のことを指す。土壌中の硫酸根濃度は、降雨などを含む大気からの負荷、植物の分解、施肥、溶脱、植物吸収と微生物活性との間に収支上の変化があるため、年間を通して変動する。たとえば、冬季から春にかけての溶脱および植物による吸収と低温から生じる低い無機化速度のため、この時期の硫酸根水準は通常低い。

硫酸根は水可溶性の塩あるいは土壌の無機構成要素に吸着されたもので存在する。硫黄供給の面からは土壌水分、水力的特長は重要であり、可溶性プラス吸着態硫黄が植物に有効である。

吸着態硫黄

土壌中の硫酸根の保持は土壌膠質の性質、pH、硫酸根濃度や溶液中の他のイオン濃度に影響される。硫酸根は鉄、アルミニウムの酸化物、粘土粒子端に吸着されているが、完全な静電機作で吸着しているとの学説や、OHあるいはOH₂

との配位子交換によるとする化学吸着説もある。これらの機作には明瞭な相違があって、実験的にどれが正しいか裏付けることは困難である。したがって、硫酸根は配位子結合をするだろうが、同時に水分子によって鉱物表面から分離した外界複合体を形成するだろうとの見解が正しいであろう。硫酸根の吸着量は粘土の表面積、表面荷電に依存し、したがって土壌のアルミニウム含量が高ければアニオン吸着量が大きくなる。

硫酸根吸着に及ぼすpHの影響は鉄、アルミニウム酸化物の正味荷電量と関係がある。土壌pHが荷電零点（ZPC）よりも低ければ、鉄やアルミニウム酸化物の水和によって正荷電を帯び、硫酸根が吸着される。このように、たとえば森林植生下の酸性の下層土壌、また泥炭土壌は典型的に吸着態硫黄に対して大きな容量をもっている。しかし、農耕地土壌ではpHはしばしばZPCよりも高く、硫酸根の保持が少ない。石灰施用は硫酸根を土壌から脱着させ、無機化を増大させるので硫黄の溶脱を促すことにもなる。

硫黄の吸着は他のアニオンの存在でも影響される。土壌中アニオンの吸着強度の順位は、水酸基 > リン酸 > 硫酸根 > 硝酸根 = 塩酸であり、吸着態硫黄の抽出にリン酸を用いる根拠は硫酸根よりリン酸の吸着が強いことである。したがって、リン酸施用は硫黄を溶脱させることにもなる。

吸着態硫黄が植物の硫黄栄養に直接の役割をもつことは少ないが、土地全体の硫黄バランスには重要な意義がある。植物生産のない土地や森林は、大気からの負荷量が少ないときに硫黄バランスはプラスになる。これらの土地では土壌酸性が強いので余剰硫酸根の貯留がみられ、硫黄バランスではプラスに働いている。しかし農耕地では硫黄は大気からの供給よりもほとんど持ち出しになるので、これら両方の土地がもし地下水を通じて連結していれば、上記の貯留から恩恵を受けることになる。このようなことから、非生産的土地だが硫黄を貯留する土地の割合よりも硫黄を必要とする農耕地が増えるならば、硫黄欠乏がより多くなるものとみられる。

(4) 土壌からの硫黄損失

土壌硫黄のおおよそ90%は有機態であるが、土壌へ硫黄を加えたりあるいは土壌から取り除いたりすることで最も影響を受けやすいのは、植物に有効な無機態部分である。この有効態硫黄の貯留は無機化や脱着によって増加し、固定や土壌硫黄の循環過程のなかでの吸着によって減少する。以下、温暖地域で土壌から硫黄が除去される要因ならびに作物栄養上の意義を述べてみる。

溶脱

溶脱とは雨水の浸透によって土壌養分が表層土から下層土へと垂直移動し、ついには地下水にまで動くことをさす。しかし、下層土での浸透が遅いと、水分は下層土の上を水平に動いて、実質的な養分量を低い箇所へと運搬する。この横方向への水の動きは、降水量の多い地域や平坦でない地形では養分の枯渇あるいは集積を生じる。溶脱は降水量が蒸発散量と植物による吸収および土壌断面を飽和するに要する合計水分量を超えたときに発生する。したがって溶脱される養分量は、とりわけ溶脱水あるいは排出水の水量に依存するが、必ずしも降水量と関係しない。

溶脱を受けやすい硫黄は土壌によって相当異なる。土壌中では主に有機態で存在するが、無機化されなければ溶脱しにくい。全硫黄の10%未満が無機態、すなわち不溶性、水可溶性あるいは吸着態の硫酸根であって、このうち、不溶性のものはわずかに溶脱されるが、植物には有効でない。ときどき石灰岩土壌に炭酸カルシウムと共沈している。水可溶性の硫黄は非常に動きやすく土壌から溶脱し、また土壌へ吸着、固定される。あるいは春、夏に植物の根活力があるとき、植物に吸収利用される。なお、吸着態硫黄が溶脱に対抗できるのは、土壌の保持力あるいは吸着容量のためであって、降水量が同じでも土壌の状況によっては硫酸根の溶脱を防ぐ様相が異なる。

硫黄の溶脱に影響する要因をあげてみると次のとおりである。

1) 土性……砂土のような排水良好な土は吸着容量も低く、溶脱しやすい。

2) 作付けと休閑……多くのライシメータ試験によると、栽培中よりも休閑中の溶脱が大きい。また、傾斜地では表面流去水があると溶脱は減少する。

3) 硫黄の施肥……通常の肥料には土壌から容易に溶脱する硫酸根が含まれる。溶脱しやすい土壌には単体の硫黄あるいは硫化鉄（パイライト）が使われることもある。これらは最初土壌中で硫酸根に酸化されなければならず、この反応速度は肥料の粒径に影響され、粒径が80メッシュよりも大きいと、施用シーズン中に一部しか利用されない。

4) 無機化……土壌微生物や植物が同化過程に使うよりも硫黄の無機化が増えたとき、溶脱も多くなる。

5) 収支平衡……岩石の風化によって解放された初期の硫黄が未だ化学的あるいは微生物的な過程に移らぬままで、新規に生成されたような土壌を別にすれば、非農地に対する大気、降水のような気象的な硫黄の付加と、溶脱や植物の吸収によるロスとの間にはバランスが保たれている。この平衡状態では無機化あるいは固定のような硫黄の動きはないものとみられ、溶脱する硫黄の量は気象、あるいは降水からの給源量の変異に依存している。しかし、農耕地土壌におけるこの硫黄系は、作物の収奪によって減少し、また、施肥や栽培期間中あるいは排水によって有機物が分解して無機化されることで増加し、絶えず平衡が攪乱される。肥料あるいは有機物から無機化した硫黄は溶脱を受けやすく、植物に利用されない限り温暖な地域では表層土から迅速に溶脱してしまう。

土壌侵食

次に、土壌侵食からの硫黄損失をみると、当然ながら侵食した土壌の量とその硫黄含量が影響する。温暖な地域で降水量も中位、地形が平坦で地被植物があれば侵食量は少なく、年間に1ha当たり約0.1kgSの侵食量と推定されている。しかし、季節的降雨量が多く、傾斜が急で林地あるいは植生が疎らな状況では風や水による侵

土壌における養分の動態

食は見逃せない。1ha当たりの土壌侵食量が12tとすると、3～6kg/haの硫黄損失と推定される。

ガス揮散

農耕地からの硫黄のガス揮散は無視できるが、水田のような湛水土壌では硫化水素として揮散する。植物の頂部からジメチルサルファイド、メチルメルカプタンなどが揮散する。穀類のわらが燃やされると亜硫酸ガスとしてかなりの量が揮散するので、ヨーロッパ各国では禁じられている。問題は、アフリカ大陸のように途上国の硫黄欠乏地帯で作物や有機物資源が燃やされて揮散することである。

作物による収奪

作物による土壌からの硫黄収奪は、高成分肥料、特に窒素を多量施用し農業が集約化されて増収するほど大きくなってきた。牧草類では1ha当たり30kgの硫黄を収奪するが、それでも土草、家畜の連鎖系の中で硫黄は短期間にリターンして土壌中に残存することが知られている。たとえば、綿羊放牧で牧草に吸収された硫黄の90%はこの系に残り、10%が動物生産（羊毛、肉）として持ち出されるとの報告がある。牧草がサイレージに使われても、硫黄は後に厩肥やスラリーとして還元される。問題は作物として圃場から持ち出したときであって、硫黄は系から失われ大気から充足されない限り施肥によって補われる必要がある。

もう一つの収奪要因は作物体の生理的要求に基づく硫黄含量である。植物の全硫黄は通常0.15～1.00%の範囲にあるが、キャベツ、カブ、ナタネの硫黄要求量は高く、ナタネでは1ha当たり60kgを吸収する。イネ科作物は概して中間であるが、穀類や根茎作物の要求量は少ない。

本稿の冒頭で、根を通じて可給化される様相が土性によって異なるという動的な観点の重要性を指摘したが、わが国の人工草地で生育した牧草を対象にした結果をみてみよう。

研究目的は牧草の硫黄吸収が施肥された硫黄に依存するのか、あるいは土壌本来の硫黄肥沃度に依存するのかを明らかにすることにあつた。その結果、代表的な牧草、オーチャードグラスおよびシロクローバの全硫黄含量は火山灰土壌、

鉾質土壌間で差がなく、牧草を採取したそれぞれの人工草地に対応する野草地土壌の硫黄肥沃度と土性の影響を受けやすいことが認められた（第2図）。すなわち、粗粒質土壌の硫黄吸収は土壌の有効態硫黄増加量に対して反応が鋭敏であつて、中～細粒質土壌では緩慢であり牧草の硫黄含量は顕著に増大しなかった。したがって、粗粒質土壌での硫黄の収奪はその溶脱も大きいことと併せて留意する必要がある。

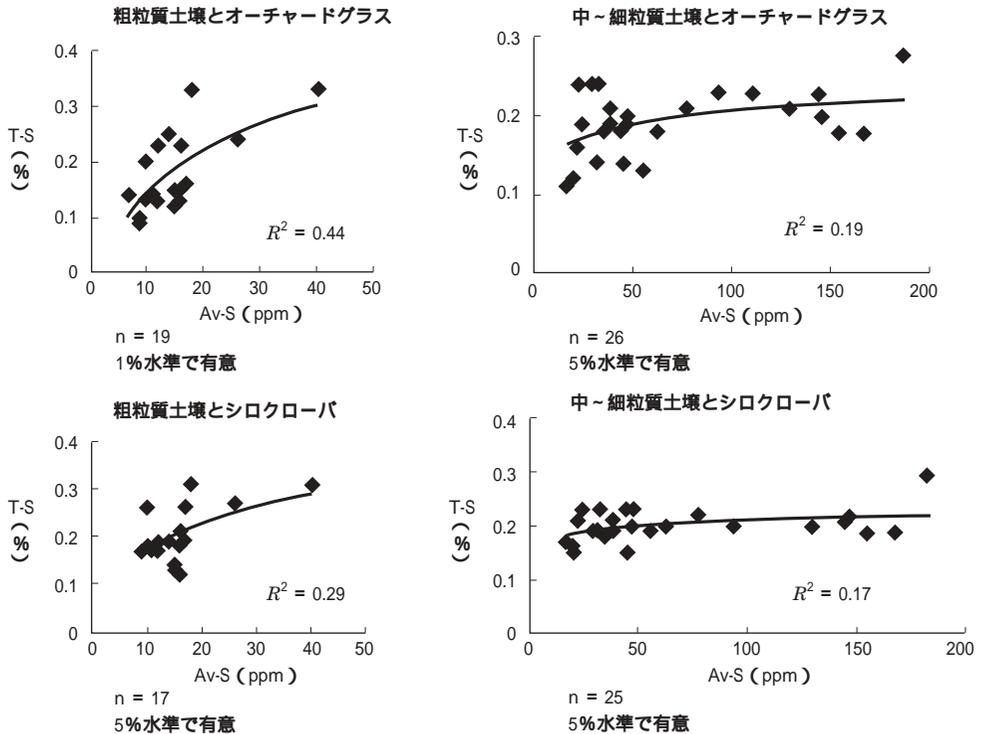
(5) 土壌への硫黄負荷

大気中の亜硫酸ガス

多くの植物は大気から硫黄を摂取してその含量を増大することができ、しばしば植物の硫黄要求量に十分であることは植物養分中でも硫黄をユニークなものとしている。特に、北半球では連続して相当量の硫黄が化石燃料から放出され、大気中の亜硫酸ガス濃度が高まることはしばしば言われているところである。硫黄に欠乏した作物にとっては大気中の低～中濃度の亜硫酸ガスが天恵であると同時に、植物に有害なガス成分でもあつて、酸性雨の元凶になることは矛盾したことでもある。

大気中の亜硫酸ガス濃度は、アフリカのような遠隔地では $0.5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 、英国などの工業地帯では $300 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 以上と大きな幅がある。降水と対照的な乾燥降下物としての大気中の亜硫酸ガスは植物の茎葉や土壌に直接吸着されるので、適当な作物あるいは土壌を使ってその表面濃度と降下速度が推定できる。植生への降下速度は裸地土壌よりも2～3倍速い。雨水中に SO_4^{2-} 濃度として降下した硫黄と乾燥降下物の亜硫酸ガス態硫黄との割合は降水量や大気中の濃度によって異なる。この比率は、降水量が少なく大気中の亜硫酸ガスが高い地帯では30%まで下がるが、逆に降水量が多く亜硫酸ガス濃度の低い地帯では80%まで上がる。

英国あるいはヨーロッパ大陸における大気からの植物への硫黄供給は年間20～50kg/haと推定されている。植物栄養上、雨水から供給される硫黄の重要性は以前から知られていたが、乾燥降下物からの供給役割は近年評価されるよう



第2図 牧草の硫黄含量に及ぼす野草地土壌の有効態硫黄および土性の影響 (辻, 1980)

T-Sは牧草の乾物当たり硫黄含量, Av-Sは土壌の乾土当たり有効態硫黄を示す

になった。硫黄欠乏土壌で生育する植物は硫黄要求量の50%まで大気中の亜硫酸ガスから吸収することも知られている。

このように適当量以上の硫黄が大気から供給されるため、新しいNPK肥料が製造され硫黄が完全に省かれても不思議ではなく、硫黄はこのように無視された要素になった。

しかし、ヨーロッパのなかでも工場源から遠隔の地では作物要求を満たすのに十分でない場所もあって、1960年代から70年代にかけてドイツ、フランス、ノルウェイといったヨーロッパ各国では飼料作物の硫黄欠乏が報告された。アイルランド、スコットランドでは様相が若干異なり、大気圏からの供給が少ないことで約30%以上の土壌が硫黄欠乏となった。

一方、大気中亜硫酸ガスの植物への有害作用もよく知られており、低濃度の曝露は気孔を部分的に閉鎖して光合成を阻害するが、高濃度の

曝露は葉脈間にクロロシスやネクロシスを起こして葉に対する可視的な障害を与える。障害は曝露時間、濃度、植物の種類、植栽間隔、温度、光線、植物水分などの要因で大きく変動するが、植物はSO₂を吸収して無害な形に同化できることもわかってきた。

亜硫酸ガスの減少と作物への影響

近年では、汚染物質、亜硫酸ガスを除去するために行政施策あるいは国際協定として脱硫装置が工場に設置され、多くの国々で亜硫酸ガスの放出が減少した。しかし、大気中の亜硫酸ガス濃度が減少したことの作物への影響は、英国で硫黄欠乏が報告される形でさっそく表面化しており、ハーレイ草地研究所での観測値によると大気中の亜硫酸ガス濃度は1979年の30 μg/m³から1982年の14 μg/m³へと4年間で顕著に減少し、供試した牧草の生産も硫黄欠乏によって減少した(第2表)。ドイツでも1980年代から減少

土壌における養分の動態

第2表 大気中硫黄濃度の減少が牧草の収量，硫黄含量に及ぼす影響

(プリストウ・ガウウッド，1984)

年次 (年)	亜硫酸ガス ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	収量* (t/ha)	硫黄含量** (%)	N/S比**
1979	29.6	12.6	0.307	9.9
1980	26.0	11.9	0.298	10.8
1981	16.5	10.2	0.281	12.8
1982	14.3	9.6	0.214	15.1

注 * : 4種土壌から9回の採草収量

** : 9回採草の加重平均

を続け、1990年のドイツ統一を境として油糧用ナタネの硫黄欠乏がきわめて顕著になった。これは、旧東ドイツが旧西ドイツや近隣の西欧諸国に相当量の亜硫酸ガスを‘輸出’していたことにもなる。

行政施策はもちろん作物収量を減じるためにとられたのではなく、その背景は高濃度の亜硫酸ガスが人体の健康、建物、土壌、植生、特に土壌・森林の水生態系へ及ぼす悪影響を防ぎかつ減らすためであった。東ヨーロッパは1980年代末まで西ヨーロッパとは逆に大気中硫黄濃度が高く推移したが、その後の経済情勢によって西側と同様に減少に転じた。作物収量や品質を維持向上させるには大気からの硫黄は肥料によって代替されねばならない。

灌漑水，有効土壌水分

世界の乾燥地帯では灌漑水中の硫酸根濃度は一般に300～1,500mg/lあり、作物要求量に十分な濃度である。温暖な地域では濃度は低くなり、季節、河床の基岩と川の汚染度に影響される。ヨーロッパの諸河川では5～100mg/lと記録されている。水田では灌漑水中に19mg/lあると水稻の硫黄要求量が満たされたとの報告がある。ヨーロッパ農業でも大部分の作物の硫黄要求はこの灌漑水で満たされている。

農作物の硫黄バランスをみると、硫黄の施与と作物硫黄吸収との間に大きなギャップが見られ、このギャップはこれまで植物による亜硫酸ガスの直接吸収によって埋められると考えられていた。しかし、作物の硫黄バランスを埋めるにはこの直接吸収量は非常に少ない。大気から

の施与のみで、また植物が硫黄を吸収している間のみ多く施与されるような条件を考えても、植物がひどい硫黄欠乏にならないような場所はヨーロッパのどこにもない。しかし、大気からの供給が少ないにもかかわらず、硫黄欠乏が起きない場所が依然として多くある。

したがって、硫黄バランスを考えるにはこれまで無視されてきた要因をみる必要があった。すなわち、有効土壌水分あるいは浅い地下水に溶存し、貯えられた硫黄である。この硫黄は土壌とは何ら物理的吸着あるいは有機物との関連で生化学的な交互作用はなく、土壌水として動くだけである。土壌水分の硫黄給源としての重要性は未だ広く認識されていないようである。

浅層地下水あるいは植物に有効な地下水に硫酸根が貯えられる機作には、1)石膏やパイライトのような天然の硫黄鉱物と浅層地下水あるいは土壌水が接触、2)硫黄吸着力が高く、植物吸収量が少ない酸性の森林土壌のような、硫酸根に富む下層土をもつ同じ地帯での地下水の内部流入、3)‘スポンジ’効果(絞上げたスポンジが水を吸い上げる力は、スポンジ空隙の粗さによって異なること)による硫酸根の土壌充填、がある。最後のスポンジ効果の機作は重要であって、作物の硫黄施用に対する反応がなぜ土性に影響されるか説明している。硫黄の貯蔵容量は植物有効水分の貯蔵容量の関数でもあって、それには土性、次いで土層の深さ、植物根が届く土壌の容積が問題となる。土壌の水分貯蔵容量が大きいほど溶脱による水分や硫黄の損失は少なく、蒸発散によって硫酸根の濃縮も生じる。すなわち、土性が細かい土壌ほど粗い土壌に比べて硫酸根を多く保持できる。

厩肥

動物は尿、糞からほぼ等量の硫黄を排泄する。乾乳牛と泌乳牛では若干異なるが、糞への硫黄排泄割合は63～70%と高い。放牧地の牧草中大部分の硫黄は家畜を通してこのような形で貯蔵され循環するが、硫黄の各土壌画分へ行く経路や転移も研究されている。

舎飼い家畜の場合、厩肥あるいはスラリーとして農地に還元され、乳牛スラリー(乾物5%

換算)が1ha当たり50m³散布されると、1ha当たり12~36kgの硫黄が還元され、そのうち26~54%の硫黄が24~38年の半減期をもって土壤中に残存するという結果もある。スラリー中の硫黄は主に尿なので溶脱されやすく、また糞中の硫黄も土壤中ですべて無機化される必要があって、即農的な硫黄の評価を行なうことは困難である。もちろん、これら有機物の長期連用によって土壤の硫黄含量は増大するが、作物への反応となると鈍いことが報告されている。植物タンパク中の窒素と硫黄の比率はおおよそ15:1なので、厩肥あるいはスラリーに由来する硫黄を計算するには窒素の約6.5%としてもよい。

化学肥料

硫黄が無視された要素であることには二つの要因がある。まず、多くの工業地帯では大気中の硫黄が作物要求量を満たすに十分であったこと、第二に肥料が硫安、硫加のような副成分をもち、硫黄は自動的に施用されることが多かったからである。しかし、大気からの供給減とあいまって、硫黄をほとんど含まないNPK高成分肥料の普及は硫黄施用量を減らし、また、集約化に伴う高収量による持ち出しの結果、硫黄欠乏が顕在化し硫黄の見直しが必要になったわけである。

硫黄欠乏土壤では硫黄の施用によって作物の増収と品質改善が見込め、さらに一定の生産量を得るに要する窒素質肥料の施用量をかなりの量まで減らすことができることも知られている。これは窒素多施による弊害に関心がある国々では、大きな環境的意義をもつものと思われる。

(6) まとめ

土壤硫黄の給源は有機態および無機態に分けられ、前者は土壤硫黄の90%以上を占めている。作物に有効な硫黄は無機態であり、硫酸根が主体となる。しかし、有機態硫黄のうち、硫酸エステルは土壤酵素の加水分解によって無機化さ

れて有効化する。炭素結合の有機態硫黄は比較的安定なため土壤微生物がエネルギー源として利用しない限り無機化されない。硫酸エステルは炭素結合の硫黄にも再配分される。

無機態硫黄には遊離および吸着態があって、前者は溶脱されやすいが、後者は粘土粒子、鉄、アルミニウムに結合し、土壤酸性などの影響を受けやすい。

土壤からの硫黄の溶脱は、吸着容量が少ない粗粒質土壤で顕著である。また、休耕地で溶脱が多くなる。作物からの収奪量はナタネのような吸収量の多い作物もあるが、イネ科作物の吸収量は概して少ない。牧草中の硫黄は放牧によって土、草、家畜の連鎖系で循環するが、牧草が生育する土壤本来の硫黄肥沃度、特に土性の影響を受けやすい。

作物は大気中の硫黄(亜硫酸ガス)を乾燥降下物として吸収し、その要求量の50%も充足できる。しかし、近年の公害防止策は大気中の硫黄濃度を減少させた結果、欧州では作物の硫黄欠乏が顕在化している。農地に隣接する地域から地下水、有効土壤水分中の硫黄が豊富に供給されるようであれば、大気からの供給減の分は相殺されよう。しかし、集約化に伴う高収量とあいまって硫黄収奪が多い栽培体系では硫酸根肥料の施用も必要である。

執筆 辻 藤吾 (JICA専門家)

参考文献

- Eriksen, J., M. D. Murphy and E. Schnug. 1998. The soil sulphur cycle. *In* Sulphur in Agroecosystems. Edited by Ewald Schnug. p.39-73. Kluwer Academic Publishers. Dordrecht/Boston/London.
- 辻藤吾. 1980. 牧草および野草の硫黄含量. 土肥誌. 51, 221-228.
- 辻藤吾. 1986. 主要火山灰土壌の硫黄の化学形態. 草地試研報. 35, 62-72.
- 辻藤吾. 2002. 水稻の硫黄欠乏 - 滋賀県湖北のやみ田. 農業技術大系 土壤施肥編. 第6巻, 66-15.