

講座

土の中の物質移動 (その1)

—土の中の物質移動のよりよい理解のために—

中野政詩* 宮崎 毅*

I. 土に関わる現代の課題

現代、土に関わって、きわめて重要な課題がわれわれには課せられている。その幾つかを挙げてみよう。

食糧をはじめ、われわれにとって有用な生物の生産に当って、省力、省エネルギー、省資材等を図り、コスト低減を実現したい。

基盤整備や農地開発に当っては、開発経費を削減し、高収量圃場を造って投資効率を高めるとともに、周辺土地環境への影響を極力抑えたい。

農地における土壌侵食を防止して、農地の荒廃を防ぎ、地力を保持し、下流の環境を維持したい。

農地からの過剰肥料成分や家畜糞せつ物の流出を抑えて、周辺環境汚染を防ぎたい。

小規模農村排出污水を地区内で処理して、農村生活環境を高めたい。

さらには、地下水の最適利用方法を明らかにしたり、河川の渇水予測をして、水資源の最適利用を図りたい。

広くは、砂漠化防止あるいは緑化などに代表されるように、国土土地資源の優良化を図り、緑と水の豊かな自然環境の創生を図りたい。

そして、こうしたことを土地の上に実現するには、いろいろな施設や構造物を建設する必要があるが、それに適した土基盤や土構造物をどのような土地にでも確実に造りたい。挙げれば、まだまだたくさんであろう。

こうした課題は、わが国のみならず世界各国で大きな声になっている。そのため、農業土木学の分野だけでなく、土木工学、土質工学はもとより生物生産科学、土壌

肥科学、環境科学、水文科学、自然生態学、地形地理学、地球科学等の分野でも重要な研究課題とされている。

考えるまでもなく、このような課題は、土に関する科学技術の側面だけで解決が完全に図れるとは必ずしも言えないが、簡単に言ってしまえば、まず土がそれぞれの課題にとって最も適切な状態にあれば、まず解決される事柄である。すなわち、いずれも、土についてわれわれの知恵を尽くし、土の状態を最適な状態に制御してやることでまず応えられるものであるといえる。そのために、広く各方面で土の制御への期待が強く、その手法を捜し求めていると思われるのである。

II. 土の物質移動に関する科学技術の必要性

では、土を制御するという事は、一体どういうことなのであろうか。土の制御は、直接的には、たとえば、土層改良でいうように、客土による土の粒径組成の改良や深耕による土の密度や間隙構造の改良などによって行われる。これは、それだけのことで土が個性的に持つ性質を変えたという意味に過ぎないが、実は連動して土の透水性や保水性を変えている。また、床締め、硬盤や不良土層の排除などに見るように、土をある厚さを持った土層として理解するとき、層序すなわち異なる物理性を持つ土の層の積重なりの変更も土の制御の一つになる。この場合でも、土層全体についての透水性を変えると同時に、各層の保水の特性を変え、土層全体の保水性を変えてしまうことになる。その他、暗渠を埋設することも土を制御することの一つである。このときも、やはり、土層全体についての水の透過の状況や各土層における水の滞留の状況を変えることになる。つまり、土の制御は、土の保水とか土中の水の貯溜などを水の移動とい

* 東京大学農学部 (なかの まさし、みやざき つよし)
土中の物質移動, 水移動, 化学物質の移動

キーワード

う概念の中に含めていえば、いずれも土の固相部分に手を加えることによって土中の水の移動を制御することであるといえる。

ところで、土中の水の移動状況を変更すれば、そのことによって土の乾湿の変化の状況を著しく変えてしまう。そうするとまた、土粒子の表面における化学物質、正しくいえば、イオンの保持あるいは吸着離脱の特性を変えてしまう。そればかりではなく、土地の表層を覆う土の中にいる種々の微生物の生息状況を変え、土中有機物の分解やそれに伴うガスの吸収、発生の状況を変化させてしまう。こうしたプロセスをたどって、土中の化学物質やガスの貯溜状況が変化してくる。そもそも、化学物質の移動は、水の移動によって行われている。したがって、土の制御は、ガスも化学物質の中に入れていえば、いま述べたような事情の変化をもたらしながら、化学物質の移動を制御することになるともいってよい。

さらに、水の移動によっては、微細な粘土鉱物自体も、水と一緒に大間隙をたどって土中を移動させられることがある。また、土壌侵食にみられるように、土粒子は、土中への水の浸入速度を越えるような大降雨の際に発生する地表水の流れによって地表を移動するときもあり、この移動も土の制御によって変化させることができる。

つまり、土を制御するということは、土中の水、化学物質、ときには土粒子自体を含めて、こうした物質の移動を制御することになる。そこで、いま、土の制御の手法を求め、その適用の評価を適切に行うために、土中の物質移動に関する知識が必要とされるわけである。

III. 土中の物質移動を理解する姿勢

1. 土の実像

さて、土中の物質移動を知るには、まず、移動の舞台であるところの土の実像を知らなければならない。

土壌物理学では、土を知るには、まず、乾燥密度と固相率、それに粒径組成を知ることとされている。乾燥密度は、単位体積当りにいかにどの個体物質が詰め込まれているかを示すもので、関東ロームの 0.55 g/cm^3 ぐらいから、重粘土や砂にみる 1.60 g/cm^3 程度である。乾燥密度を真比重で割ると固相率が与えられる。真比重は、有機物を多く含む特別の土を除けば、たいてい2.62前後であるので、乾燥密度は固相率の指標ともいってよい。さらに、 $1.0 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ から固相率を引けば間隙率が得られる。間隙率は、関東ロームで $0.8 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ ぐらい、重粘土や砂で $0.5 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ 前後をとる。粒径組成

は、土がどの程度の大きさの個体粒子の集まりとなっているかを示すものである。これは、粒径別に個々の土粒子を礫、粗砂、細砂、シルト、粘土、ある場合にはさらにコロイドと呼び分け、土が持つおのおのの比率によって示す。ところで、この比率によって、土に、土性名、これは粒度名ということもあるが、つまり名称を付して、土を分類する。関東ローム表土の例では、粗砂18%、細砂15%、シルト29%、粘土39%ぐらいの比率にあるといわれ、ライトクレイ (LiC、日本農学会法) の土性名が付けられている。さて、この粒径組成の違いは、土の間隙の大きさの違いを造っている。粗砂や細砂が多い土は個々の間隙が大きく、シルトや粘土分の多い土は個々の間隙が小さくなっている。しかし、現実には、こうした事柄を知っただけでは土の実像を知ったことにはならない。さらに進んだ知識が必要である。

土は、上に述べた意味の土粒子を基本にして造られているとされているが、実は、一次鉱物といわれる石英、長石類、輝石、角閃石類、それに雲母類などからなる不定形の一次粒子を主体とし、その表面にもっと粒径の小さい二次鉱物といわれる粘土鉱物が付着して、こうしたものが寄り集まってできている。しかも、粘土鉱物を付着した一次粒子は、有機物でさらにその周囲を覆われていたり、鉄やアルミニウムの水酸化物、多糖類物質などにより、他のこうした粒子と強く結合して、団粒といわれる二次粒子を構成している。したがって、土はこの二次粒子の集合体であるというほうが土の実像として正しい見方である。さらに、広く大きいスケールで土を見れば、土は、植物根の残跡、小動物の生活跡、外部に与えられた力による破断線跡、乾燥収縮による亀裂跡などによって、大小の塊に分割されている。土は、その程度にそれぞれ違いがあるとはいえ、固相部分にこのような構造を造っている。こうした土の固相部分の造る間隙は、一次粒子や二次粒子によって造られる微小なものから大きな土塊を囲むような大間隙まで、その大きさはまちまちで、形は、膨らんだり、すぼまったり、曲がったり、パイプ様もあればシート様もあるといったように極めて不定形である。つながり方は、分枝したり、連結したり、極めて複雑である。しかし、その中で、水が移動し貯溜され、水を介してイオン交換や化学物質の移動が行われ、微生物が生息し、有機物の分解作用が営まれ、ガス交換やガスの拡散移動が生じている。

したがって、土を見るときに、もし小さい体積、たとえば一辺1~2 cmの立方体で切出して、これを見ると、それ以上の大きさの土塊はその一部分しか取り込まれないため、二次粒子の集まりとしての土の理解はできる

が、土に土塊があることは理解できない。また、一次粒子や二次粒子によって造られている微小な間隙は理解できるが、亀裂などの大間隙は理解し難い。つまり、切出した土の大きさによって理解できるものが異なってくる。大きな土塊や亀裂を知ろうというときは、一辺 10 cm 以上、必要ならば 200 cm 以上の大きさで土を見ることになる。したがって、土中の物質移動を見るとき、微小な間隙の中で見るか、亀裂などの大間隙の中で見るか、観測のスケールをわきまえて見ることが求められる。たとえば、雨水の浸潤とか排水などでは、大間隙の中での水の移動を見ることが重要だし、蒸発とか水消費などでは、どちらかといえば、微小な間隙のなかで移動を見ることが重要になる。

2. 水の移動

土中の水の移動は、土の間隙の中で行われるが、個々の間隙の中での移動を一つ一つ見ていって土として水の移動がどうかという理解をしようとする、間隙の形が複雑すぎるし、一つ一つ形が違い、数が多すぎるし、その中での水の存在の仕方もいろいろであるので、解析に困難を来し、その理解は複雑になる。現実的に冒頭の課題に答える際の科学技術としては、土としての水の移動についての知識が重要である。そこで、一つの連続体として見なした土について、土の単位面積当りの流量すなわち、流束で土中の水の移動を見ることにしている。この流束を決めるものはダルシーの式である。これは、土中水を動かすポテンシャルと土中水を動かすまいとする土の抵抗を意味する水理学的伝導度とから構成されている。多くの場合、土中の水移動は不飽和状態すなわち間隙中に水と空気が共存している状態で生じているが、このときの流束は、土中の全ての場所で皆違う大きさとなっているといつてよい。土中の僅かに距離を隔てた2地点における流束の違いは、質量が常に保存されるという原理によって、その間に挟まれる土中の水の貯溜量すなわち土中水分含量を流束差の分だけ変化させる。もし、土中に植物の根がある場合には、この外に、根が単位時間当りに吸収する水の量が加算された質量保存の原理が働き、それに従って土中水分含量が変化させられる。したがって、土中の水の移動は、このダルシー式と土中の水の質量保存の原理とによって知ることができる。

こうしたことで土中の水分移動は理解することができるが、これを視覚的にみるには、土地の乾湿とか灌漑や排水の制御等に関係して、土中水分の量の増減を知りたいときは、土中の水分量の分布を示す分布曲線の経時変化を導いて、これを見ることが望ましい。土中水の流束を知って水の移動自身の特徴を知りたいときにはポテ

ンシャルの分布を示す曲線の経時変化を描いて、これを見ることになる。また、大気とか地下水とかの周辺環境との関連で、周辺との境目での流束の経時変化を見ることが大事になる。

ところで、いままでとくに断わらずに、土中の水として液状の水を想定していた。しかし、土中には、水蒸気として存在する水がある。この水は、土中の水分量として測るときの水の量としてはほとんどひっかかってこない。しかし、土が乾いたとき、水蒸気の移動は水分分布の変動をもたらす。つまり、水蒸気の移動は、間隙から液状の水の占める空間を除いた残りの空気の占める間隙の中で行われる拡散移動が主役であるが、水蒸気は、いつも土中のどの地点でも、移動しながら、液状の水との間で蒸発や凝縮という形の水の交換をしている。蒸発ではその土中水分量を少なくし、凝縮ではその土中水分量を増すことになる。したがって、とくに乾燥地の水問題を考えるときなど必要となるのだが、土が乾いたときの水蒸気の移動には十分な考慮を払い、液状の水移動にこれを加えて全体の水移動を考えることになる。

3. 化学物質やガスの移動

化学物質とは、たとえば肥料成分、土壌改良材やその投下により土壌粒子の表面から離脱し、遊離した諸物質、重金属や放射性物質等を含めた土壌汚染物質などであるが、この移動は、土中の水の中で拡散移動によって行われるとともに、土中の水の移動によって輸送されるような移動、これは移流による移動といわれるが、これによっても行われる。しかし、水の移動を見るときと同じ理由から、やはり、土の単位面積当りの移動量すなわち流束で見ることになる。ところで、土中の水の中の拡散は、間隙の折れ曲がりの状況や拡散に有効な通水断面積、これは体積当りの含水率で表現できるが、こうしたものによって影響される。その影響の程度は拡散係数の捉え方の中で考慮される。また、移流による移動は、一つ一つの間隙の中の水の流速が違うために、個々の間隙ごとにその大きさは皆違っているが、それは水の流束を用いることで対応が行われている。

当然のことながら、化学物質の移動も、着目している物質についての質量保存の原理によって考慮される。しかし、この場合、この原理の適用に当っては、いささかとまどいを感じる現状にある。すなわち、化学物質の移動が水を媒介にして行われるので、その流束にしても質量保存の原理にしても、それは、土中の水の中で考えられ、土中水におけるその濃度を指標にして考察される。さて、この土中水における濃度も、間隙ごとに異なり、一つの間隙の中でも差があって、しかも水に含まれる化

学物質が固相の表面との間で吸着離脱の交換をしたり、微生物の活動や有機物の分解があるため、これにより変化する。これを質量保存の原理の適用の際に考察しなければならないが、こうした間隙中の濃度分布、間隙間の濃度差、とくにイオンの吸着離脱の速度などを的確に考慮する方式がまだ明快に与えられているとは言い切れず、いまあるものの適用に際して慎重さを要するのである。

ガスの移動では、一般にガスは酸素、二酸化炭素などであるが、水蒸気の移動と同様に、空気の占める間隙の中で行われる拡散移動が主役である。やはり、これも流束で見てもよい。この場合の質量保存の原理の適用では、微生物や植物の根の代謝作用によるもの、有機物の分解によるもの、などのガス交換を考慮することが大切になる。しかし、その交換は、空気間隙中で行われるものの外に、水で周囲を囲まれている微生物や有機物によるものがあり、空気部分でガス移動を見るときは、そのまま水中でのガスの拡散移動を調べなければならなくなることが特徴である。

なお、これらの移動の様子を見るには、やはり、化学物質なら土中水中の濃度、ガスなら土中空気中の濃度、これらの分布変化を導くことになる。しかし、ときには、乾土の単位重量当りの存在量で見るときもあるので、注意を要する。また、周辺環境との境目での流束を見ることも不可欠である。

4. 熱移動の影響と土の体積変化の影響

水移動にしても、化学物質の移動にしても、それは温度の影響が大きい。土は、太陽エネルギーを熱の形で貯溜したり、反対に大気中に熱を放出したりしている。そのとき、土中では、熱の移動が生じていて、やはりその土中における流束の差によって土中に温度の分布が形成され、経時的にも、季節的にも変化する。たとえば、砂丘地にみられるように、地表では、夏の昼間に最高 50°C を越えたものが、夜間には 20°C 近くまで低下する。それでも、こうした温度の変化は地下 40 cm ぐらいまでで、それより深いところではほとんど一定温度で推移する。地下 200 cm 以下では一年を通してほぼ一定となっているといわれている。

温度の分布があると、温度の勾配すなわち微小単位距離当りの温度差によって、液状の水も水蒸気も、高温部から低温部に向かって移動するものが発生する。また、温度勾配があると、それによって土中水に溶解している化学物質の濃度の勾配が造られ、これによる化学物質の拡散による移動が付け加えられる。つまり、温度分布があるときには、このような形の物質移動について考察を

加えて全体の物質移動を見なければならなくなる。

ところで、反対に、土中で水の移動があると、移動する水によって熱が運ばれ、土中の温度分布の形成がそれによって影響を受ける。また、地表も含めて土中での水の蒸発、凝縮などの相変化があれば、これによっても土中の温度分布の変化がもたらされる。土中の物質移動を見るときには、この点にも目を向けることが大切である。

さて、水移動や化学物質の移動が進むに伴って、土自体が膨張したり収縮して、土全体の体積が変化する場合がある。それは、わが国の水田に見られる重粘土やベントナイトで代表されるようなモンモリロナイトという粘土鉱物を多く含む粘土で典型的に見られる。こうした粘土は、よほど乾いたときを除いて、間隙は水で満たされ空気を含むことはない。そして、粘土粒子自体は薄い板状であり、これが多数積重なって一つの塊を造って、個々の粘土粒子の間に水を挟み込んでいる。こうした塊が集まって粘土としての体を成している。粘土に水が潤沢に与えられると、この粘土粒子間にいくらかでも水を挟み込み、塊のかさが大きくなり土の全体積の増加をもたらす。水が少なくなれば、粒子間の水の量が減り、その分だけ塊のかさが小さくなって、土の体積の減少につながる。つまり、水の占める間隙が、水の移動に伴って時々刻々と変化する。言い換えれば、粘土の乾燥密度が水の移動に伴って変化する。したがって、粘土中の水の移動は、この点に考慮を払って解析することになる。また、化学物質を含む水を粘土に与えたとき、たとえば、ソーダ質粘土の改良の際に見られるようなナトリウムを多く含む粘土に石膏や塩化カルシウムを含む水を与えたとき、粘土鉱物の表面でナトリウムとカルシウムとの交換が生じ、それにより粘土鉱物同士の位置関係に変化が起こって粒子の造る構造が変わって間隙の構造が変化し、水移動の様相が変わってくる。したがって、粘土中の水の移動では、こうした構造変化の事情にも配慮して理解を進めることになっている。

5. 土中の物質移動と現実的課題との接点

さて、土中の物質移動により、物質は土中に貯溜されたり土中から奪い取られたりして、その土の状態を変え、性質までも時には根本的に変える。冒頭に述べた土に関わる諸課題の処理に当たっての土の制御のあり方の模索と関係しては、植物の成長の最適化に関わる課題や地力の保全に関わる課題の場合、こうした土中における変化の様子が解析によってまず求められる。水にしる、化学物質にしる、ガスにしる、土の中での存在量の変化が植物の成長や地力の大きさを左右するし、この最適なあり方を求めて土を制御することになるわけだからである。

ところが、土はそれだけで存在しているわけではなく、質の異なる外界に取り囲まれていて、その境界を通しての物質の出入りを常に行っている。たとえば、多くの場合、土地の表面で、植生を介して大気と接し、降雨、散水、湛水、蒸発、などにより大気と水の交換をする。地下では、地下水帯と接して、これと水の交換をする。側方では、河川や明渠、暗渠など水を制御する構造物と接し、水の交換をしている。化学物質は、この水の交換に伴って、地表では土中水の蒸発により集積されたり浸入により洗脱されるし、地下では地下水中に流出する。また、側方では、河川に流出したり、構造物の壁に付着したり吸着される。

そのため、土中の物質の存在量の変化は、外界からこの境界にその物質の出入りがどのように強制的に生ぜしめられているかを知らなくては、これを知ることにはできない。この境界での物質の出入りの様子は、境界の条件として与えられるといわれ、土中の物質の移動の様相がこれによっていろいろな形をとって現れてくるので、この様子には特段の注意を払い、的確に把握することがこの解析の場合の条件として必要不可欠である。

さらに、最初にどのような状態にあったか、ということも土中の存在量を見るときには見忘れてはならない。最初の状態として、土中の物質の存在のありさまや移動の形態はいろいろあって、解析の手段が若干異なってくる可能性があるからである。

しかし、その一方では、境界での物質の出入りを巡って、逆に、土が、どのような外界とどのような境界で区切られていて、その境界にどのようなインパクトを外界に向けて与えているか。このこともまた冒頭に述べた土に関わる諸課題の処理に当たっての土の制御のあり方と関係して、境界の条件としてではなく、物質移動の解析の結果として求められるものとなっている。たとえば、前にも述べたが、水の蒸発に伴う塩分の地表集積による土の塩性化や地下水面への土中水の降下浸透による地下水涵養などでは、まさに、土から外界に向かう土の境界での移動量を知ることが求められ、この知識によって土の制御が検討される。こうしたときの答えを得るための境界の条件の把握には、水の場合は駆動力としてのポテンシャルであったり、化学物質の場合は土に接している水の濃度であったり、問題に応じていささか注意して工夫を要することになる。

つまり、土に関わる諸課題の処理に当たって土を制御しようとするとき、土中の物質移動についての把握が、土の中のことを外界から与えられる境界の条件を与えて知ろうということなのか、土が境界を通して周辺に与える

物のことについてしかるべき境界条件のもとで知ろうということなのか、課題の性格を見て、これを的確に判断することがはじめに行われなければ適切な把握は成し難い。

IV. この講座の進め方

以上述べたように、土中の物質移動を理解するためには、土の中で起こるいろいろな変化を知っている必要がある。そして、水、化学物質、土粒子自体、熱、おのおのの移動に関わるそれ以外の他の物の移動の影響の程度を知っている必要がある。

そこで、この講座では、水、化学物質、ガス、おのおのの移動について述べるものを1ないし2報程度を用意しながら、それに関係するような事象、たとえば化学物質の交換現象、有機物の分解や微生物活動の影響等について述べるものをその前後に置く。その後、冒頭の土に関係する現実的諸課題に関わるような物質移動の理解について述べるものを置く、といった構成にした。

しかし、今までに述べてきたようなこの課題の性質上、始めから最後まで目を通すことによって始めて、土中の物質移動の全体像が浮かび上がることにならざるを得ない。それでも、講座の最初の部分の九つほどは、基礎編ともいべきものであり、最後の三つほどは応用編といってもよいものであって、ここで分けて目を通すことは可能である。

なお、この講座の執筆編集には、石田朋靖、岩田進午、遅沢省子、粕淵辰昭、久保田 徹、塩沢 昌、高木 東、田淵俊雄、中野政詩、藤井克己、溝口 勝、宮崎 毅の諸氏を予定し、次のような表題が予定されている。

1. 土の中の物質移動のよりよい理解のために
2. 土の中の水の浸潤と貯溜
3. 土からの水の蒸発と消費
4. 土における化学物質の交換現象
5. 土の中の化学物質の移動
6. 土の中の微生物の消長と物質変化、物質移動
7. 土の中における有機物の分解と物質移動
8. 土の中のガスの成分変化と移動
9. 土の中の物質移動と熱移動の相関
10. 土の管理と物質移動
11. 植物成長と土における物質移動
12. 自然環境の保全と農地における物質移動

引用文献

- 1) 土壌物理研究会編：土の物理学，森北出版（1979）
 - 2) 毛管浄化研究会編：土壌圏の科学，土壌浄化センタ（1983）
 - 3) G. S. キャンベル：パソコンで学ぶ土の物理学，鹿島出版（1987）
- [1988. 4. 11. 受稿]