



## 土の粒子は全部わかるのか — 一次の展開に向けて

南條正巳<sup>1</sup>

土の研究に携わり、間もなく41年となる。過ぎてしまえば、短い。土の研究を始めたのは1977年であったが、それ以来ずっと気になっている課題は「土の粒子は全部わかるのか」である。ここで「粒子」とは、初期の頃、土の固相を形成しているものという意識であった。そして、物理学では素粒子なるものが論議される中で、土を構成する粒子が全部わかるのは当然かもしれない、というあせりであった。

それでも、少し冷静に考えれば、「原子」という粒子のレベルで土を捉えるなら、全部わかったと言ってほぼ良からう。土の元素組成は有効数字3桁程度で分析できる。

しかし、土の元素組成がわかったからと言って、土の性質を推測するための情報は限られている。土がわかるには、元素の結合と組み合わせから成る化合物、鉱物、コロイドのレベル、そして、それらが3次元的にどのように組み合わせられて構造体となっているか、それらは土の於かれている環境の変化に応じてどのように変化するか、生物との相互作用はどうかなどの情報が必要である。

土にはその材料となる岩石や火山灰などになかったものができることは多々ある。土の固相は有機物と無機物である。土壌有機物は動植物由来し、普通、岩石や火山灰にはなく、土のあるその場にできたものである。有機物には生物、低分子～高分子有機化合物が含まれる。そのうち、腐植酸やフルボ酸のゲル濾過法による連続的な分子量分布を見たとき、当時の単離精製を旨とする有機化合物の同定法では歯が立たないと思った。また、ほとんどの土壌有機物は定まった化学形態を持たないかもしれない。その他に抽出すらできず、半ば炭のようなものも含まれるヒューミンもある。

それなら無機物はどうかとなるが、これを使えばいいじゃないか、と思う場面が土の研究を始めてすぐの頃にあった。それは当時の分析機器展で見た走査電子顕微鏡 (SEM) と特性X線の測定による元素分析 (EDX) の組み合わせである。しかし、当時、その装置は金額的に手の届くものではなかった。

土の研究者としての前半の12年間を農林水産省の研究機関で過ごした。そこには土の広い研究領域のほとんどすべてがあった。悔やまれることは、12年かかってもその土の広い研究領域を勉強するに至らなかったことである。その後、大学に移っても、当初は、EDXを装着した電子顕微鏡はなかった。しかし、その後の電子顕微鏡が更新される時、SEMと透過電子顕微鏡 (TEM) の両者にEDXが取り付けられた。その経緯はわからないが、当時の電顕室職員によれば、最近はどこでも付けているから、とのことであった。当時の装置は液体窒素で冷却する必要があり、準備に手間はかかったが、たいへん有り難い思いであった。

その装置で最初に試みたことは新鮮火山灰に含まれるアパタイトの検出であった。比重の重い液で重い鉱物粒子を分離しておいて、SEM-EDXで得られるカルシウムとリンの元素マップを見るとアパタイト粒子を探すことができた。アパタイトについては土壌環境中にもあり得る無機酸、有機酸などとの反応を調べていた所、シュウ酸との反応の場合アパタイト表面にシュウ酸カルシウムの被覆ができることがわかった。その他の酸では添加量に応じて溶解が進むだけであった。

次に取り組んだのはアルミニウム13量体の硫酸塩であった。この結晶はうまく作ると正4面体だけのものになるが、無定形の沈殿との混合物となることが多い。当時はあまりよい光学顕微鏡写真が撮れず、形の記録にSEM、元素分析にEDXが有効であった。しかし、これは土の粒子から離れ過ぎたモデル物質かもしれない、この課題は中断した。

その後、稲のイオウ欠乏に取り組んだ。ある土壌をポットに詰めて稲を湛水栽培すると、稲は生育不良となるが、硫酸カルシウムを施与すると回復した。そのときの稲の根は黒くなるが、その根はどんな状態であるかSEMで見ようとした。そのときに稲の根にあったものはリン酸第一鉄 (ビビアナイト) の結晶であった。その結晶は稲の根の中から外側に突き出ていた。EDXからすぐにリンと鉄が成分であることがわかり、ビビアナイトであることも容易に推察された。しかし、鉱物の同定には元素組成の他に原子の並び方に関する情報が必要である。そのときにはX線のビームを絞る技術もあり、目に見えないわずかな試料の回折データも得られるようになっていたが、装置は手元になく、その機械メーカーの研究所に行ってデータを取ってもらった。翌年、その装置を含む研究費を申請したが、採択

<sup>1</sup> 東北大学大学院農学研究科

に至らず、開示されたコメントを見た後は、身の丈に応じた申請をすることとした。

それはともかく、還元状態の土から根をシャワーヘッドで水洗いし、風乾するだけで、ビビアナイトを土から取り出すことができた。だが、文献にはその時点から三十年ほど前にビビアナイト様の物質が水稻根にあることがすでに報告されていた。その報告は光学顕微鏡による観察で、微量の鉱物を同定するに至らなかったためか、「様」という接尾語が使われていた。それ以来、水田のビビアナイトが研究報告に出ることはなかったようだが、海外の著書には、落水し土が酸化される過程で、即ち、酸化により第1鉄イオンの活動度が下がる過程でビビアナイトが溶けてなくなるとの理論的な推測もされていた。普通、水田の土の調査は湛水期間には行わない。その後の検討の結果、稲の根よりも作土そのものにもビビアナイトは晶出することがわかった。予めビビアナイトの集合体よりも小さい土だけを篩で分けておいて1ヶ月ほど湛水保温した後ビビアナイト集合体を篩などで回収する方法を組み立てた。これにより、まだ経済的ではないものの、土にたまる一方であったリン酸肥料を、一部ではあるが、土から回収しうる状況となりつつある。

水田の落水・酸化により溶けたビビアナイト由来のリンはどこにいくかということだが、それは酸化によって土の孔隙や水稻根にできる鉄の沈殿物（斑鉄）に保持されると見られる。そのリンはSEM-EDXで斑鉄に検出できる。この状況をより明確に観察するためには、土塊を樹脂に包埋し、研磨した試料が効果的であった。

土塊の樹脂包埋試料を使うようになって、いよいよ土の粒子は全部わかるのかという課題に取り組むこととなった。樹脂包埋の過程で土塊の元の状態から変化がないとは必ずしも言えないかもしれないが、無機物についてはほぼ未攪乱の土に近い状態の試料となっているのではないかと期待している。樹脂包埋状態の無機物のX線回折データは得られないこともないようだが、都合上SEM-EDXからの推測となっている。そのため、別に土塊を分解・分画し、全体的にどんな鉱物が含まれるか判定しておく必要はある。そうすれば、多くの粒子はSEM-EDXから推定できる。その結果を見ると、生物活動の影響が強い表層の土の中では元素の分布が極端に分化する傾向がある。黒ボク土のように土になる過程でケイ素、カルシウム、ナトリウムなどの元素が大量に溶け出して、全体的にアルミニウムが多く残る土でも、元素マップを見るとアルミニウムが多い中でケイ素だけからなる粒子は点々と見つかる。それらは風化抵抗性の強い石英以外に植物が体内に濃縮したケイ酸体である。逆に、アルミニウムだけが検出される粒子もある。既知の鉱物としてはギブサイトの可能性があるが、それとは異なりアルミニウムがハニカム模様に分布していた。それは私が未経験だっただけで、既知の菌核であった。

土は農業を含むほとんどの場においてマクロなレベルで取り扱われるものであり、土の科学はマクロな場面で役立つ必要がある。そして、これまでに土をマクロにサンプリングし、マクロな試料を粉碎・均一化して、分析や測定をすることが多かったと思う。その結果、マクロのまま扱う土の現象のほとんどは記述され尽くしつつあるかも知れない。そのような中で新しい展開をするための方法の一つとして、土の粒子レベルに立ち戻って、これまでの土の測定方法を見直す、というのはどうだろうか。たとえば、様々な土の成分の評価法に選択抽出法や可給態養分の抽出法などがある。その有効性は標準物質を添加・分析する方法、示差X線回折法、示差赤外線吸収スペクトル法などを組み合わせて評価されてきた。あるいは、目的成分やそのモデル物質を同位体ラベルする方法もある。だが、その目的とする成分の確認をSEM-EDX等を使い、土の粒子レベルで目視しながら進めるのはどうだろうか。時間と手順はかかるかも知れないが、土の理解を進めるための新しい展開に繋げて行けないかと思う。時間と手順がかかるかも知れない理由は、試料を画像として見ると、すぐには同定できない、しかし、ある程度目的とする粒子と関係しそうな随伴粒子もあり、その粒子の同定をある程度する必要があるのである。マイクロな部分が特別すぎないことの確認も必要である。

土壌物理学会に参加して気のつくことは、化学的な測定結果がだいぶ多く発表されていることである。そして、そこから学ぶことは、その測定結果の取扱いや考察が私よりも総合的で、深く、幅広いように感じることである。そのスタンスは土の科学の発展に必須であり、大切にしていきたい。

これまでに「可視化」を心がけるようになって、様々な土の成分の多様な有様をエンジョイすることができた。しかし、冒頭に述べた土の粒子に関する課題の追求は時間切れを迎えつつある。観察し残した試料、まとめに至らないデータがある中で、土の研究をもっとエンジョイしたいと思わないこともないが、時計は容赦なく進む。これまでに土を通じてお会いした国内外の皆様へ感謝したい。