

資 料

環境質のための土壌科学

—知っていることをどう知るか?*

B.P.ワーケンチン** 著
溝口 勝*** 訳

(Soil Phys. Cond. Plant Growth, Jan., 67, 59-64, 1993)

要 旨

私たちが持ち合わせている環境問題に応用可能な土壌の情報は私たちが土壌科学で求めてきた問題の種類に依存することが論議される。いろいろな種類の問題を問ってきた過去150年間は4つの時代に分類される。最後の時代には最初の時代と同じ問題があったりする。今や私たちの考え方が作物生産へのインプットとしての土壌から変わりつつある時に、地球の変化に介在する土壌プロセスを強調する一つの見通しを与えるために、これらの時代の特長が論じられる。

土壌科学の情報をどのように環境質の関心事に応用するか？私たちは応用可能などんな土壌科学の情報を持ち合わせているのか？土地との関係は明白である。すなわち、水質は土との相互作用に起因する。これをどう理解しその理解をどう応用するのかがもっと複雑である。本論では土と水との相互作用についての知識に土壌科学の流れがどのように環境質決定に対して影響しているのかを理解するために、その流れのいくつかを見てゆく。

要は私たちは問う問題の種類によって私たちの知っていることを知るのである。問題様式は直線的な進み方ではない。むしろ螺旋形である。私たちが現在いるところと150年前に問われた問題の間にはいくつかの類似性がある。しかし違いもまたある。つまり、螺旋であって円ではない。私たちは決して同じところにもどっているのではないのである¹⁾。私たちは前世紀に一般的で地球的な問題を問い、細かな研究に成功し、そして今また一般的でエコロジカルで地球的な問題に戻ってきた。私たちは

細かな見方をしていたときには一般的なエコロジーを問題にしなかった。そのため、土壌が環境の健康にどのように作用するのかという問題に対する解答を見いださなかった。私たちは特定の問題を問い、優れた技術的な解答、すなわち最も成功したものとして作物生産のための土壌管理を見出した。

一つの学科の中で問われる問題はその学科の教育や社会が抱えている問題あるいは個々の科学者の経験に依存している。学科が作られる以前、土壌科学の初期の時代には異なる科学の学科(化学、地学、生物学など)から人々がやって来て異なるアプローチをもたらした。その効力は北アメリカよりヨーロッパで長く続いた。この重大効力の影響は検討されないうままでのまである。

トーマス・クーンは著書科学的革命の構造の中で科学における支配的観念に着目し、それらが徐々に変化することではなく段階様式に変化することを見いだした²⁾。彼はその段階をパラダイム変化と呼んだ。各時代にはその時代の支配的なパラダイムがあり、それが私たちの問う問題を決定する。もちろんそのパラダイムに従わないへそまがり者もいる。プレートテクトニクスは地学における最近のパラダイムシフトの最たるものであった。そうしたシフトの後に、科学活動の大部分が科学の隙間を埋めてゆき、新しいパラダイムに基づいて観測された現象を説明している。しかし徐々に説明できない問題が蓄積され、そして誰かがそうした問題を説明する新しい見方、つまり新しいパラダイムを提案する。そんな訳で支配観念には穏やかな変化はなく、飛躍の繰り返しと埋め込み時期があるのである。

土壌科学における主要な時代を振り返る前に、資源に

*Soil Science for Environmental Quality—How Do We Know What We Know?, the Journal of Environmental Quality, 21, pp. 163-166 (1992)

**B. P. Warkentin, Department of Crop and soil Science, Oregon State Univ., Corvallis, OR 97331-2213, U.S.A.

***三重大学生物資源学部

対する私たちの一般的な姿勢の変遷について言葉を整理しておく。土は天然資源の一つである。制度や法律に映し出された姿勢が私たちが土壌科学ですべきことを決定する。

ブレーメン大学のウィンター³⁾は更新可能な資源に対する姿勢を4つの時代に分類した。最初の時代では、資源の消費が低く、ゴミは有機物的で容易に再生され、社会には資源の使用方法を定める規則はほとんどなかった。次に、資源開発、更新不可能な資源の高度利用、毒性汚染物質の放出、そして開発の利権を保障するあるいは天然資源の配分を規定する法律が増加した時代へと移り変わった。アメリカ西部における土地 (homesteading, 自営農地法) と水資源利用の法律 (appropriation doctrine, 専有主義) はそのよい例である。この時代は汚染された環境を処理する必要性を反映しつつ、自然を計画管理する時代に譲られた。分配を基本としていた法律は環境保護法や環境浄化法に変わった。これらの法律は既にわかっている状況を取り扱ったが、これから出現してくる問題を扱うには不十分であった。この状況が最近になって、環境への配慮が他の政策立案の一部にさえなっている今の時代に引き継がれた。環境的な関心は持続的発展 (sustainable development) という概念の中で、経済学上の計画に統合されるに違いない。水質は汚染防止法によって保証されるわけがなく、作物生産の実践の一部になる。

それでは、こうした背景を踏まえて土壌科学における支配的な時代を見てゆこう。

1850年以前

土壌科学の最初の時代は1850年頃に終わった。これは実に多くの変化がこの時期あたりに起こったということで都合のいい年である。1847年、土壌科学の曾祖父の一人でヨーロッパの地理学者、パロン・アレクサンダー・フンボルトがコスモスを著した。この中で彼は自然界について知られている全てのものを統合しようと試みた⁴⁾。

これはそうした統合の最後の試みでやがて時代遅れとなった。知識は有限ではない。私たちにそうした統合などできないが、全ての科学と文化を理解できる人間に対してはルネッサンス・ウーマン (Renaissance woman) というフレーズを用いて、いまだにその統合を懐かしみながら語っている。しかし1850年頃以後、その活動はディリッタント (素人評論家、dilettante) という言葉によつ

てより正確に記述された。ただしそのことは一つの試みではあるが不成功に終わっている。

1850年に利用できた土壌の情報はかなり一般的なものであった。私たちの知識の中には一つのエコロジカルな色調があった。そのほとんどは技術に由来する。たとえば耕うんの必要性や鍬についての研究は私たちに土壌管理について多くのことを教えた。私たちは自然システムを一般的に記述したが、この時期はその記述を受け入れることから、自然システムを知る方法として実験的な測定に変わりつつある時でもあった。

フォン・リービッヒの影響 (1850—1910)

1850—1910年の第2期は土壌分析と静的性質の研究の時代であった。草分けの出来事はたぶんリービッヒの著書「農業と生理学への応用における有機化学」⁵⁾がドイツとイギリスで出版されたことであった。ジーセン大学で働いていたフォン・リービッヒは腐植理論を信用せず、農業生産に別々にインプットする時代を先導した。これはいわゆる“疲弊土壌”の現象が一般的に知られていた北アメリカでは非常に関心が高いものであった。当時疲弊土壌の解決策は西部に移動するか肥料を使うことであった。リービッヒの本は農業の実践に多大な影響を及ぼした。栄養素の土壌分析と共に農芸化学はおよそこの時期に始まった。やがて全要素成分の分析は信用されなくなったが、その分析はさらに進んだ研究方法を開いた。1850年までハーバードとエール大学でこれらのトピックスに関する講義があった。「農業科学の出現—ジャスタス・リービッヒとアメリカ人 (1840—1880)」⁶⁾というタイトルで1975年に出版されたマーガレット・ロスターの本の中に、この時期の優れた記述が引用されている。

1850年以降、他の多くの変化が足早にやってきた。1845年は最初の人工磷酸肥料が作られたということで注目に値する。1849年にはバルチモアで最初の混合肥料が製造された。1851年には農場面積と研究室についての近代的な概念をもつ最初の農業実験場がライブチヒ近郊に作られた。アメリカでは州立の農業大学が開校された。1857年創立のミシガン農業大学は現存する最初の大学として誉れ高い。早期に創られたいくつかの大学、たとえば1853年にニューヨークに創立されたものは生き残れなかった。1862年の年にモリル法 (Morrill Act.^{*1)}、1887年にハッチ法 (Hatch Act.^{*2)} ができた。1908年にはアメリカ農学会 (The American Society of Agron

*1アメリカで南北戦争中に制定された、農科大学を設立を目的とした公有地払い下げの法律。これによって設置された大学をランドグラント大学 (land grant college, 土地交付大学) と呼ぶ。

*2州立大学が先導してアメリカ農務省 (U.S. Department of Agriculture, USDA) と共同研究をすることを認めた法律。

omy) が設立された。

土壌化学が先ずリードし生物学的な研究が遅れて出てきたことは驚きでもなんでもない。生物学的研究は結局パスツールの業績が一般に知られるようになった1860年になってからである。土壌水では、1850—1910年の時期は飽和土中の水の流れから不飽和土中の水の流れに関する基本的な考えができたダルシーからバッキンガムの時代ということで注目に値する。グリーン・アンプト式は1911年である。ウルニー雑誌「農業物理学に関する研究」(ドイツ語)の1800年代後期の出版物は土壌の物理性と測定法の多くを確立した⁷⁾。

この時期の終わりまでに近代的な様式の教科書が利用できるようになった。その章だては今日使われている教科書と同じである。1907年、フレッチャーがミンガンで土壌というタイトルの本を出版した。⁸⁾「土」に関するキングの本⁹⁾は1895年である。ラッセルの「土壌条件と植物生育」の第一版¹⁰⁾は1912年に出版された。

この時代、私たちは土壌管理に関連する特定の問題を扱った。土壌の構成と管理に関する知識を築いた。正解は問われる問題を通して得られた。今では数分でできるような土壌試料の磷酸分析を当時リービッヒの研究室では完了するのに2日間要したかも知れないが、とにかく磷酸肥料の基本的なアイデアはその時に確立された。

土壌科学 (1910—1940)

次の時代は概ね1910年から1940年と見られる。私たちはこの時期を土壌科学自体が、特に広範囲に広がる資源として研究された時期として特徴づけられるかも知れない。土壌分布図、地学の貢献、野外土壌に対する化学が天然資源の分配問題に応用された。

1800年代の後半に、ドクチェフはロシアの風景の違いに基づいて土壌分類と土壌起源に関するアイデアを作り上げた。彼のチェルノーゼム報告はドイツを経て1880年代以降にアメリカにたどり着き、今世紀初期までに土壌についての考え方に影響を与え続けていた。ヒルガードはいろいろな土壌にどんな使い方ができるか、どこで木綿を生育すべきか、土壌と気候に関する報告などといった問題を問いつけた¹¹⁾。これは巨視的にみた土壌の変動性の研究であった。

景観スケールの土壌の侵食と保全の問題はこの時期に出てきた。土壌と関係のある水質の問題はまさにかんがいのための水質の問題であった。この時期は資源開発と資源利用の規制の時代であった。資源の質を保護することへの関心は後から出てきた。

土壌技術 (1940—1980)

1940年から1980年の次の時代は土壌技術の全盛期で、一回につき一変数を研究するベークンの概念の開花の時代であった。構成要素が研究され、土試料がしばしば土壌と混同され、微量の土試料が試験管の大容量の溶液の中に加えられ、乾燥しふるい分けられた土のコラムが土壌プロセスを研究するのに用いられた。平衡状態が一般的に仮定された。作物生産がこの努力の原動力であり、管理システムよりインプットが強調された。土壌は農業生産に対する唯一のインプットであった。経済学モデルの中で、土壌は固有価値ではなく単なる付加価値を持つものとされた。もしも土壌が希少なものであったならばその価格が上がるので、私たちは別のインプットに代えたであろう。この努力からすばらしい線形的な問題解法が生まれた。

この時期には一般的に直感があまり使われず、プロセスからの推論も強調されなかった。たとえ短期間とはいえ効き目を測ることが良いと考えられた。これは様々な構成要素についての問題を問うのに大変生産的な方法であることが判った。たとえば、最大作物生産のために窒素肥料をどれくらい加えるべきかという問題である。したがって、1、2年以上の時間スケールを持つプロセスや現象を進展させるような情報はほとんどなかった。実験は短時間で、土壌中の長期的な変化は予見されず、研究されなかった。この時代に作物輪作に関してどれだけの論文が出版されたであろうか？その結果、土壌中の生物学的なプロセスについての関心あるいは理解は全く進展しなかった。統計と平衡が仮定されたのだ。

問題は単純な問題からひねくれた問題の範囲で分類され得る。単純な問題は全てのピースがあって全ての形がわかっているジグソーパズルに例えられる。それはピースを正しい向きに並べていく問題である。問題が難しくなるにつれて、ピースのいくつかが紛失し、形もわからなくなり、そしてかなり後になってからピースがどんなだったかわからなくさえる。社会的な問題がひねくれた問題の一方にあるのに対して、技術的な問題の大部分はこのスケールでいう単純な問題の一方にある。

1960年代、アーバングラント大学制度(都市交付大学, Urban grant university system)に対して貧困や(雇用)機会などの都市型問題を解決するよう提案がなされたが、同様にランドグラント大学(土地交付大学, land grant university)は農業生産の問題を解決する上で大いに成功した。私たちが現在アーバングラント大学を持たないのはランドグラントの成功が比較的単純な線形的生産問題と一緒だったからである。同じ制度は地

方機会のような比較的複雑な問題に関してはほとんど成功しなかった。問題の種類のごくこうした影響の別の局面は、農業化学工業がランドグラント大学での研究を統制するかといった今の論争である。私はこの局面は「化学の金」が実験の種類を決定するというよりはむしろ単純な線形的インプット問題が強調されていることだと思っている。私たちは今やもっと複雑な問題を問うことを学んでいるのである。

この時期に私たちが求めた問題はどのようにして環境質に関する解答を決定したのだろうか？土壌中の殺虫剤のような合成有機物の吸着や移動に関する研究から、私たちは殺虫剤が土壌中のごく限られた範囲を動くだろうと予測した。地下水は危険ではなからうと。この結論は攪乱した土試料を用いた純平衡実験に基づいたものであった。この時期の終盤までにしてそうした結論が選択の流れを伴う自然土壌系でのきわめて微量な殺虫剤の移動に対しては正しくないことを知った。私たちの求めた問題が私たちは土について何を知らなければならないかを決定した。また私たちはリンは土壌中で全く動かないので排水では問題とはならないだろうと予測した。今では環境質を考慮した水質基準はある排水中のリン濃度と同じである。

実験の短さとそれに付随する土壌の生物学的プロセスへの不注意のため、私たちはこの時期の終わりに出てきたいいくつかの関心に対して未防備だった。土壌の変化は緩やかである。生物学的プロセスを引き起こすまでに系は5年のオーダーを要する。したがって、そうした土壌の生物活性変化は一年や二年の野外実験ではわからなかった。私たちの導いた結論は私たちの求めた短期間の問題に対しては正しい。しかしながら、私たちはこれらのプロセスを理解し、そのプロセスを基にして直感的に理由を考えているうちに、異なる実験が異なる結果を与えるだろうということがわかった。

もう一つの関心は相互作用に関するもので、それは土壌システムの研究では説明するのがきわめて難しい。実験では一回に一つだけの要因を考えるとというベーコン学派の型はきわめて生産的ではあったが、そのため私たちは相互作用や連結やエコロジーについて深く考えなくなった。私たちの問う問題のためにあるものが見失われる可能性がある。私たちが受け入れあるいは忠実に使っている統計手法は測定された作物の反応に関して土壌の変動性の効果を除去するように作られた。そのため統計手法は土壌変動性の性質と役割について多くのことは教えないことが予期される。

土壌技術の時代は私たちが景観スケールの問題を問う答えねばならなくなったときに終わった。研究問題は変わらざるえなかった。自然の変動性が説明され、平衡で

ないことが受け入れなければならなかった。またしても土壌管理に関する長期間の実験が明らかに価値あるものとなった。生物学的な機能システムとしての土壌に関する興味は螺旋の中で私たちを前のドクチェフ時代に戻している。

私たちはいまだどこにいるのか？

1980年後の現時点でどんな問題が問われているのだろうか？自然景観の中で土壌を考えるとという点で、多くの問題は螺旋の中で私たちをフンボルト時代に戻している。土壌の質は脱塩するとか塩分除去のためにどれだけ余剰水を加えねばならないかといったことを確立するような問題ではなくなってきた。むしろ土壌の質は土壌の利用や土壌の多様性に対する自由度の概念である。土壌は潜在的利用に耐えられなくなれば退化する。変動性はもはや、いづれはすたれる単なる厄介者でしかない。そしてそれがまた多様性の強さであり生物システムの自然の特性なのである。私たちは土壌を固有の価値を持たない単なる生産へのインプットとしての考察から、温室ガスとの相互作用によって土壌が地球的な変化にどのように介入するのかという問題に移ってきている。土壌保全や土地バンク活動が環境補助金や環境管理者への償還として現れてきている。新しい森林学は森林土壌が環境質にどのように関連しているのかについて私たちが問う問題を変えるだろう¹²⁾。

変化に対抗する土壌の緩衝性は新しい意義を持ち込むものである。土壌は病気や水分過剰あるいは水分不足といった作物生産における一年毎の危機を引き起こすのではなく、木と土地との相互作用の結果生じる塩分や浸食、土壌構造、水質といった長期的な危機の問題に関与する。最近まで増えていた土壌プロセスのモデリングに対する興味は私たちが求めた問題の変化とその問題の解答に入れるインプットの変化を象徴するものである。モデルというはいくぶんプロセスについての直感的なアイデアに基づいているものである。

土壌科学における最近の教科書はこれらの変化を示している。今やフラックスは静的性質や平衡よりも重要である。陽イオン交換容量などの標準的な概念から物質の消滅や輸送に対する相互作用が議論されるようになってきている。生物学や化学、物理学などの様々な科学によってこれらのプロセスが理解されるようになってきている。そのような最近の本を3冊あげれば、ホワイトの入門的な土壌科学の教科書¹³⁾ (1987)、ロスの上級者向けの教科書¹⁴⁾ (1989)、リヒターのモノグラフ¹⁵⁾ (1987)である。

1920年代から1960年代にかけて専門的なキャリアをも

つ熱帯土壌の研究者・ハーディ教授は「若い土壌化学者や若い土壌物理学者はいるだろうが、若い土壌科学者といえるようなものはおるまい。」(1965の私信)と言っていた。これは特に私と同年代の年代的に先輩の人々には慰めになるかも知れないが、彼の言わんとするところは土壌科学の問題が複雑だということである。つまり土壌科学の問題は単純線形的な解答がある問題ではないということである。土壌科学を理解するために、私たちは多くの違った見地からアイディアと事実を合わせられるようにならねばならない。

この論文では土壌科学学科の幅広い時代をたどってきた。より遠くを見て私たちの大多数には即座にはわからないような問題を理解している人がいつもいることを心に留めておくことは重要である。こうした人々からの研究や教育思想が私たちの学科を進展させるような変化をもたらすのである。

それでは、私たちは螺旋のどこにいるのだろうか？ 私たちは再度、百年のあいだ無視してきた土壌の見方をしているのである。私たちが問う問題の種類をよく考えてみよう。フンボルトがおよそ150年前に書いた文で締めくくるのが螺旋の概念には似合うだろう。「そのとてつもなく雄大なもの全ての中で自然を理解するためには、自然に対して二面的な見方をする必要があろう。一つは客観的に実際の現象として見ることで、そしてもう一つは主観的に人類の感覚に映し出されるままに見ることである。」

文 献

- 1) Jerry, H. 1961. Reflections on the soil acidity merry-go-round. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.* 25:428-432.
- 2) Kuhn, T. S. 1970. The structure of scientific revolutions. 2nd ed. Univ. of Chicago Press.
- 3) Winter, G. 1989. Perspectives for environmental law—entering the fourth phase. *J. Environ. Law* 1:38-47
- 4) von Humboldt, A. 1850. *Kosmos*. Harpar Book Co., New York.
- 5) von Liebig, J. 1840. *Organic chemistry in its application to agriculture and physiology*. Taylor and walton. London.
- 6) Rossiter, M. 1975. The emergence of agricultural science—Justus Liebig and the Americans, 1840—1880. Yale Univ. Press, New Haven, C. T.
- 7) Zwerman, P. J., and G. R. Blake. 1958. An

index to "Forschungen auf dem Gebiete der Agri. kulturphysik." *Soil Sci.* 86:350-354.

- 8) Fletcher, S. W. 1907. *Soils—how to handle and improve them*. Doublekay, New York.
- 9) King, F. H. 1895. *The soil—its nature, relatinos, and fundamental principles of management*. The Macmillan Co., London.
- 10) Russell, E. J. 1912. *Soil conditions and plant growth*. Longmans, London.
- 11) Jenny, H. 1961. *E. W. Hilgard and the birth of modern soil science*. *Agrochimica*, Pisa, Italy.
- 12) Robertoson, F. D. 1990. The 1990 RPA:A forest service pathway through the 1990s and beyond. *J. Soil Water Conserv.* 45:626-628.
- 13) White, R. E. 1987. *Introduction to the principles and practice of soil science*. 2nd ed. Blackwell Scientific Publ., Oxford.
- 14) Ross, S. 1989. *Soil processes*. Routledge, London.
- 15) Richer, J. 1987 *The soil as reactor*. Catena Verlag, Cerlming, Germany.

訳者補遺

訳者の私は1992年のアメリカ農学会 (ASA, CSSA, SSSA) に参加した際に、論文の著者であるワーケンチン博士と話す機会を得た。「最近の環境問題に関連して日本の土壌物理の分野でも環境を意識するようになってきた」と話すと、元来日本びいきの博士は「これが何かの役に立てば」と言いながら原著論文を手渡してくれた。早速読んでみて、正に今の土壌科学に見通しを与えるものと感じたので訳すことを思い立った。

訳しながら私は身にすまされような思いを何度も経験した。この論文の内容は“アメリカ”の土壌科学の歴史と未来への見通しを与えるものであったが、それは日本の土壌科学にも十分通用するものである。そうした歴史の中で私自身の研究対象あるいは研究手法はどういう流れにあるのかを認識することができた。「農」の認識が薄れ土壌研究の方向性を見失いそうになりがちな現在において、研究というものの流れに対する「螺旋階段」説は改めて研究哲学の重要性を想起させるに十分である。願わくば日本の土壌科学に関してもこのような研究啓蒙書を望みたいものである。

つたない翻訳に過ぎないが今回の私の試みが日本の土壌科学の発展に僅かながらでも貢献できれば幸いである。

(受稿年月日1993年4月30日)