

論 説

土の水・雑考
—その形とポテンシャル—

岡 島 秀 夫*

A Thought on Concepts of Soil Water

Hideo Okajima

Dohto University Junior College Division

Key words : pF, chemical potential, Laplace equation and water form, use of equilibrium, concept and reality

(Soil Phys. Cond. Plant Growth, Jpn, 68, 57-67, 1993)

水分類の2つの流れ

日本土壌肥科学雑誌の原稿執筆規定(62巻, 1991)に、推奨される単位として、基本となるSI単位をもとに、水分ポテンシャルは圧力表示のときにはPa、水頭ときにはmとすること、そして水分ポテンシャルの表示として用いられてきたpFは使わないことが記されていた。1935年、イギリス、オックスフォードで開催された第3回国際土壌学会の全体会議において、Schofield¹⁾によって提案されたpFが約半世紀後のいま、その大きな仕事を終えたということ。また同じく約半世紀にわたって議論されてきた土壌水分の分類に、水分ポテンシャルが現在学会に定着していることを示すものとして、記事を見たとき感入なものがあった。

土の水の分類には大きく見ると2つの流れがあった。一つは土の水の形と力のバランスを中心にして実態にそって具体的に水を分類していくものである。土粒子と結びついた結合水と、毛管水・重力水などのいわゆる自由水を基本にして、土ごとにそれらの最大値を水分恒数として認識し分類する方法である。もう一つは、当時すでに完成の域に達していた熱力学のエネルギー概念を水の分類に導入する方法である。つまり、土の水のエネルギーが土に拘束されて低下することを水分ポテンシャルによって量的に求めて、水を分類する方法である。前者は土の水の実態をこと細かく観察し、網の目のように分布している孔隙のなかに存在しているさまざまな水の形を、分子間結合力や毛管力によって分類分けしていくもので、実態に重きをおいた探究方法である。それに対して後者は複雑な水の形にとらわれずに、水のエネルギー状態とい

う一つの物差しによって統一的に分類する方法である。

両者の方法論はこのように全く異なっているため、土の水の諸現象に対する理解も異なることが多く、長い間、論争があった。しかし後者が水分ポテンシャルによって水の状態を連続的に数値として表わせること、またその水分ポテンシャルがテンシオメータによって容易に求められたため、実用的評価が高くなり、現在は土の水を水分ポテンシャルによって表示することが一般的になっている。アメリカの、例えばBrady²⁾の本でも、土の水分はエネルギー概念から説かれ、その立場で毛管力などを記述に組み込んで、複雑な水の形と水分ポテンシャルの関係についても何ら矛盾を感じさせることなく述べられている。

したがって学会が水分ポテンシャルを水分類の基準にすえてきたことは、時宜をえたことである。しかし、水の実態とその特異な力との関係に基づいて水を追求した旧ソ連のローゼが、かつて提起したような水分ポテンシャルのもつ各種の問題については、まだそのままなものであると思われる。また両方法論からみた土の水の理解の矛盾が、現在すべて解決したとも思われぬ。ただし、それは単なる私の個人的な思い過ごしかもしれない。科学は普遍的な知であっても、その理解は個人的なもので、その認識に個人差があるのは、やむをえないことであろう。

大きな業績をあげて体系化されてきた土壌学は、現在、新しい展開にむかって、進むべき道を探している時代である。その時代にこそ、頭に描いている個人的な理解を話あうことが必要でないかと思ひ、水の分類について思いつくままにあれこれ考えてみた。意のあるところを汲

*道都大学短期大学部

キーワード：pF, 化学ポテンシャル, ラプラス式と水の形, 平衡の活用, 概念と現実

まれ、ご批判いただければ幸いです。

多相系の水分ポテンシャル

水分ポテンシャルとは「定温、定圧のもとで、ある物質一モル（水は18g）がもつギブス自由エネルギー」と定義されている化学ポテンシャルが、想定されるある標準状態の水の化学ポテンシャルよりも、土の水がどれだけ低下しているかを示すものである。したがって水分ポテンシャルが、吸引圧100cmということは、土の粒子に拘束されていない自由水の化学ポテンシャルよりも土の水は水柱100cm圧だけ低いエネルギー状態の水であることを指している。

ところで化学ポテンシャルの概念に「多相系で平衡状態が成立していると、各相における各成分の化学ポテンシャルは、すべての相で等しい値を示す」というものがある。重要な概念であるが、この概念を前提にして、水分ポテンシャルが千変万化の水を適確に測る物差しとして使われていることに留意したい。

例えばSchofield¹⁾がpFを提案したとき、pFの測定法の一つとして土の水蒸気の化学ポテンシャルから求める方法を示している。つまり、いろいろな種類の水が共存している土の水は多相系の水であり、その系が平衡していれば、水の一つの相である気相の水蒸気の化学ポテンシャルは、他の水の相の化学ポテンシャルと等しいことを前提にして、測定しやすい水蒸気の化学ポテンシャルから間接的に土の水分ポテンシャルを知り、それを次の式によってpFとして示す方法である。

$$pF = \log H = \log 2.303 \left(\frac{RT}{Mg} \right) + \log (2 - \log h) \\ = 6.5 + \log (2 - \log h)$$

pFのFは土の水の自由エネルギー (free energy) の頭文字、pは負の対数値であることを示したもので、水分ポテンシャルの表示であるpFを、h (相対湿度, %) に対応する土の水の吸引圧から、それを水柱高 (H, cm) として求めたものである。ただしこの方法は、絶乾状態からpF4 ぐらいまでの小さいエネルギーの水に限られているが、水分ポテンシャルの概念には、平衡状態にある多相系の各相成分の化学ポテンシャルは等しい、という前提が含まれている例として始めに引用してみた。

ロージェによる結合水の仕分け

土の水について相対湿度に注目していたのは、アメリカに端を発した水分ポテンシャル学派に限らない。物性の究明に力を注いでいた初期の土壌学では、乾土が空気

中の水蒸気を吸着して湿る現象に着目し、その現象を土粒子と水分子の結合とみて、当時の先端の実験法を駆使して、その現象を追求していた。戦前の川村²⁾のテキスト (1934) にも、それがいわゆる吸湿水として記述されている。土粒子が水分子を取り込む凝水力は極めて大きく、1~2万気圧にも達すると紹介し、この機作で保持される吸湿水の測定法として、10%の硫酸液下 (相対湿度、94%) で平衡に達した土の水分量を求めるMitscherlich法を記述している。そして吸湿水量は土の内面積と相対湿度に比例することを指摘している。さらに川村は、乾土に液状の水を加えても同じく土に強く取り込まれて吸湿水になるが、そのとき強力な力で水の分子が粒子面に圧縮されるため、遊離エネルギーが熱となってあらわれると表現し、このときの湿潤熱の測定で吸湿水量を求める方法も述べている。

「土壌の固体粒子と土壌水分とは、絶えず互いに影響を及ぼしあっている。この相互作用は、水分子に固有の、また土粒表面を構成する分子およびイオンに固有の、種々の質と量の力によって引き起こされる。」というダイナミックな考えのもとに、「土壌と水」を執筆した旧ソ連のロージェの書³⁾ (1962) は、この吸湿水について詳しく論じている。もともと、吸湿水は粒子表面と水分子との反応であるから、土の比表面積 (川村の内面積) と相対湿度に比例するものだが、ロージェは両者の関係、実験例の図1によって説明している。粒子が小さければ小さいほど粒子の総表面積は大きくなるから、図のように粒子径が小さいほど、相対湿度の増加に伴う吸湿水の増加が著しい。したがって吸湿水量は土性に支配されているが、ロージェは図のなかの径0.002mm以下の微細粒子の、相対湿度75%以上における急激な吸湿水量の増大

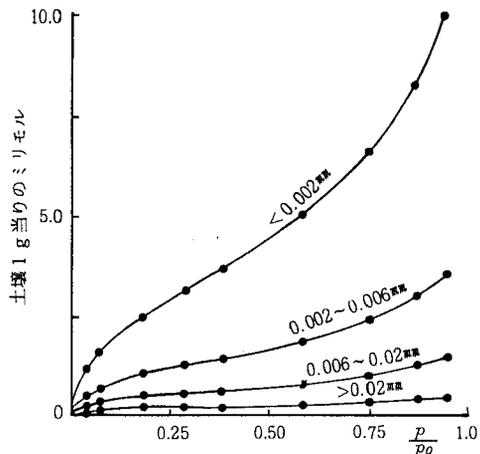


図-1 大気相対湿度と吸湿水量 (数字は土粒子径)

に注目して、その急増分は毛管凝縮水によるものと考えている。

要約すれば、湿った空気に土粒子が接すると、固有の自由な力場が働きはじめ、双極子である水分子の1つの極が土粒子に引き付けられ、残りの外側の極が他の水分子を引き付け、このようにして数十層の水分子膜が粒子表面に均一に形成される。小さな粒子2つが接している場合には、その吸湿水膜の肥厚がある段階になったときに粒子の間に凹面の水膜が出来る。このメニスカスは負圧なため、水蒸気圧が他の部分よりも低い。だからこの空間では水蒸気が他の表面で飽和しているときにはすでに過飽和になっており、凹面に水が凝縮する。この分が吸湿水に加算されて吸湿水量が急増したと推測している。この凝縮水は相対湿度94%を境にして出現するので、その条件によって両者を分類している。結合水が作り出す形によって、二次的に毛管水が生まれる話である。

また液態水と粒子の結合による吸湿水についても、川村が指摘していた湿潤熱によってその結合力を定量化し、強結合水と弱結合水を分類している。さらに土粒子とイオンによる水分子の取り合いを想定し、水分子がどちらに取り込まれるかを、土に加えた砂糖や塩化カルシウム溶液の濃度変化から推定して、強結合水と弱結合水を分別する方法も提案している。やや繁雑であるが結合力の定量化によって、水をその形と力に基づいて分類することに執念を燃やしていることがよく分かるものである。もちろん、これらの努力を水分ポテンシャル学派は評価しなかった。「熱力学的エネルギー関係を求める大きな利点は、個々の特別な水保持の機構と関係がないことにある、Schofield」のである。

ラプラス式と毛管水の形

土の水には、粒子と水分子の結合力による湿潤水のような結合水と、土の微小な隙間に出来る水面メニスカスの毛管力、あるいは重力との関係で保持されている自由水の二つがある、というのが古くからの概念である。そして自由水は拘束度合が少なく、エネルギー・レベルが高いので可動性に富むため、土の物質代謝の媒体としての機能が大きく、土壌生成、土壌肥沃度、水循環などを支配する大きな要因と考えられてきている。したがって、土の水の研究対象として古くから重視されている水である。その中で、とくに重力に抗して上昇する毛管水の特異な知見が自由水理解の要として注目されてきた。

毛管水といえば、ラプラスの式である。フランスのニュートンと称せられた数学者R.S.de Laplace (1749-1827)が示した数式である。「ある瞬間に宇宙のすべての原子

の位置と速さを知ることができるならば、未来永遠にわたって宇宙はどうなるかは解析学の力によって知ることができよう」と言ったという決定論者の代表格であるラプラスの提示した式、すなわち液体が曲面をなすときの内外圧差を表面張力との関係で示した次の式である。(この式の求め方は名著Hillelの土壌物理学概論⁹⁾に詳しい。)

$$P_1 = P_0 + \sigma \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right) \quad \dots\dots\dots(1)$$

P_1 : 曲面の圧力 P_0 : 平面の表面圧, 大気圧
 σ : 水の表面張力, R_1, R_2 : 曲面の主曲率半径

毛管によって作られるメニスカスが凹であればRはマイナスであるから、メニスカスの圧力 P_1 は大気圧 P_0 よりも小さくなること、つまり負圧になることを示している。それは毛管が完全に円筒形で、メニスカスがすべての方向に同じ曲率をもつと前提すれば、式2に変換される。

$$P_0 - P_1 = 2 \sigma / R \quad \dots\dots\dots(2)$$

式2の大気圧 P_0 と曲面圧 P_1 の差が、メニスカスが出来ることによって生じた負圧である。この負圧は静水圧に補償されて大気圧と等しくなるのであるから、水柱の高さ(h)に、水の密度(d)と重力加速度(g)を乗じて求められる静水圧によって、その負圧が表わされること、また水と管壁を完全なヌレとすれば、毛管水柱(h)と毛管半径(r)の逆比例関係は、次のジュレンの式で示されることになる。

$$h = 2 \times 74 / r \times 981 = 0.15 / r \quad \dots\dots\dots(3)$$

土の孔隙径などを算出するのによく使われる便利な式であり、土の毛管孔隙の様子がイメージされる式である。

さて、これらの毛管式によって説明される毛管現象の具体的な例としてローゼはこんな話を紹介している。いま1本の円筒毛管をとり、それに気泡を含まないように上から静かに水を入れてゆく。すると初めのころには図2-aのように、毛管のなかに低い高さの水柱が形成される。このときの平衡条件を考えてみると、3つの力の作用下にあることが分かる。それは、下方向に働く上部メニスカスの表面圧 P_1 と、同じく下向きに働く重力、それらの逆の上方向に働く下部メニスカスの表面圧 P_2 の3つである。

この水柱の圧力は言いまでもなく hdg であるから、3つの力の釣り合いは次のようになる。

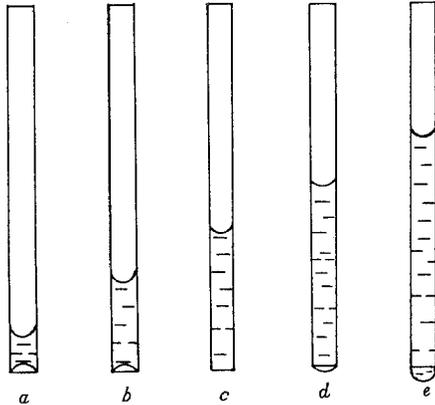


図-2 毛管中の水の状態

$$P_1 + hd \rho = P_2$$

上部メニスカスの曲率半径を R_1 、下部メニスカスの曲率半径を R_2 とすれば、ラプラスの式から $P_1 = P_0 - 2\sigma/R_1$ 、 $P_2 = P_0 - 2\sigma/R_2$ となる。これを上式に代入して整理すると、平衡条件は次のようになる。

$$hd \rho = 2\sigma (1/R_1 - 1/R_2)$$

毛管に宙づりになっている水はこの条件になっているが、それは上部メニスカスの曲率と下部の曲率が違うことで成り立つ条件である。その違いは、式や図から分かるように、上部メニスカスの曲率が下部メニスカスの曲率よりも大きいことであるの言うまでもない。

もしこの毛管にさらに水を加えていくと、水柱高 (h) の増大によって式の中の $hd \rho$ も増大する。そのため釣り合い、 $2\sigma (1/R_1 - 1/R_2)$ も増大しなければならない。しかし表面張力 (σ) と上部の曲率半径 (R_1) は一定であるから、下部の曲率半径 (R_2) が増大して対応せざるを得ない。つまり下部表面圧が増大して水を受け入れることになる。そして最後には図2-cのように、下部メニスカスが平になるときがある。この平になったときは $1/R_2 = 0$ であり、平衡状態はもっとも単純な毛管式3の、 $hd \rho = 2\sigma/R_1$ になる。この場合の毛管の水柱高が、実は同じ径の毛管をシャーレ中の平な自由水中に立てた毛管上昇現象を説明する例の平面図の水柱高と同じ高さなのである。

ところが話はそれで終わらない。さらに水を入れると、図d、eのように水柱高がシャーレ状態よりも、もっと高くなる。そのとき、下部メニスカスは図のように凸型

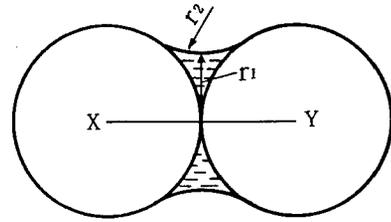


図-3 球形粒子間の接合部集積水

になり R_2 の値はプラスになる。そのため式は次のように変わる。

$$hd \rho = 2\sigma (1/R_1 + 1/R_2)$$

そしてこの状態では、下部メニスカスの曲率は、毛管の下端に出来た水滴が離れて落下するまで増大することになる。水滴が離れた瞬間に水柱の高さは最高に達する。つまり均一な径の毛管でも、毛管式以上の水柱高になることがあるという話である。通常の毛管上昇水図からは想像できない話である。

土の毛管現象の理解のために、もう一つの例を紹介したい。それは図3のように、2つの粒子の接触点に毛管力によって保持される水の集積の例である。このような孤立した水の集積をロージェは接合部集積と呼んでいるが、この場合には重力に関係なく凸面のメニスカスが関与している。平面図であるから理解しがたいが、立体的に2つの球の間に出来る水集積を想像してみると読みとれる。それは、図の r_1 の矢印を接合点を中心にして前後に一回転して描かれる曲面である。その曲面が凸面である。この凸面に対して半径 r_2 の曲面は図のように水毛管メニスカスの特徴であるマイナスの凹面である。したがってこの集積水の全曲率は、 $1/r_1 - 1/r_2$ になり、表面圧 P はラプラスの式によって次のようになる。

$$P = P_0 + \sigma (1/r_1 - 1/r_2)$$

r_2 は常に r_1 よりも小さいことが分かっているので、括弧内はマイナスの値になる。つまり集積水の表面圧 P は大気圧 P_0 よりも低くなり、そのため水が保持されることになる。このようにして凸面と凹面の相互関係によって水が保たれているのである。

科学者である以上だれしも複雑な現象を、ラプラスの式のように簡潔で普遍的な美しい言葉で説明したいと思うに違いない。しかしラプラスの関係式から、シャーレに満たした水の中に立てたガラス毛管の上昇水のみを固定的にイメージしていると、折角の美しい言葉の味を味

わえなくなろう。いま紹介した例のように、たとえ径が均一な毛管であっても、管に宙づりになった水の場合には、毛管の上部に出来たメニスカスのみでなく下部の異なるメニスカス曲率との係わり合いによって水が保持されるため、ときには同じ径でもジュレンの式から求められる水柱高よりも高くなる。毛管水高と毛管径の関係を一義的にジュレンの式で理解すると間違ふことになる。つまり毛管水柱高 (h) は視覚的なものでなく、はなはだ抽象的な言葉である。また粒子間に生じる毛管水も、負と正のメニスカスに支配される複数の毛管力によって保持されており、その中にラプラスの言葉が生きていることに気がつくと、味が深くなろう。この味をロージェは力説しなかったのであろう。

結合水と毛管水の境は

毛管水帯という用語がある。地下水に接している毛管孔隙に保持されている水で、その上限が肉眼的に比較的揃っており、地下水との間に帯状に分布しているので、こう呼ぶのであろう。土の水分環境として重要な水帯である。八幡⁶⁾は、この水帯をポテンシャルの概念によって、次のように説明している。圧力が大気圧に等しい自由水面から上方に向かって、重力の場とは正反対に高さに比例して高いほどエネルギーの低い一つの保存力場がある。これは毛管水がその先端で隙隙の中にメニスカスを張り、自由水面の上方に毛管負圧帯をつくり出している結果生ずるものであって、この毛管水帯の力場を“毛管ポテンシャル (ψ) をもつ力場”と名づけている。

地下水に接している水であるから、先ほどの話は別としても毛管水帯の高さは、ジュレンの式に従う筈である。しかし実際と理論では桁外れの違いがある。例えば埴土でよく見られる $1\ \mu\text{m}$ の孔隙の毛管上昇高をジュレンの式で計算すると、30mにもなる。ところが現実には砂質土では多くの場合5~60cmで1m以下、埴土でも2~3mという位で、3mを越える例は少ない。

この矛盾をロージェは次のように考えている。 $1\ \mu\text{m}$ 位の小さな孔隙の場合には、その内部の水は毛管水ではなくて、全部結合水でみだされている。そして小さな孔隙ではメニスカスが出来ないうち、または出来てもその負圧は粘性の大きな結合水を移動させるためには力不足であり、水は昇らない。だから毛管上昇には限界があり理論よりもかなり低いところまでしか上昇しない。つまり $1\ \mu\text{m}$ 以下の孔隙水は結合水であると考えている。いわばそこが、毛管水と結合水の境になろう。

この点に関して、ロージェの水の形の話と水分ポテンシャルの統一を図ることに大きく貢献した八幡は、先述

の本で、興味ある見解を次のように披瀝している。毛管径が小さくなって $2.87\ \mu\text{m}$ になると、吸引圧水頭 (毛管負圧を水柱高で示したもの) が $1,032\text{cm}$ (1 気圧) になる。これ以上毛管径が細くなるとその負圧というものは物理的意義を失う、という考えである。毛管ポテンシャルの力場が働かなくなる、とでもいうことかもしれないが、ともかく負圧が1 気圧以上になると毛管力は働かなくなる。そのため、1 気圧に相当する10m以上の毛管水帯は現実には出現しないことになる。

物理的意義を失うということについては、土の水の熱力学的研究の第一人者である岩田⁷⁾は、次のように説明している。もともと負圧は相対的な値で、それはメニスカスが出来ることで表面圧が標準圧 (それは大気圧と考えてよい) よりもどれだけ低下したかを示したものである。つまり絶対値ではなくて、表面圧が大気圧よりもどれだけ低いかという、大気圧との差がメニスカスの負圧である。したがって毛管の径が小さくなって、メニスカスの負圧が1 気圧よりも大きくなると、計算上マイナスの圧力になる。しかし、この世にマイナスの圧力は存在しえない。そのために $2.87\ \mu\text{m}$ よりも小さい毛管では、毛管負圧がその物理的意義を失うことになると説明している。そのときには、毛管ポテンシャルの勾配は圧力勾配でなく、化学ポテンシャル勾配としてのみ物理的意義



写真-1 天塩ポトゾル性酸性褐色森林土B層 1万倍 (波多野氏提供)

があるという。化学ポテンシャルの利点である。いずれにしても、毛管負圧は大気圧の一気圧を越えるものはないということになる。

負圧1気圧は、水柱約 10^3 cmであるからpF3に相当する。ところで植物に対する有効水分の下限はpF4.2と言われており、それは15気圧に当たる。pF4にしても10気圧である。これらの負圧水を、その圧に相当する圧力によって引き出して有効水分の一部として定量しているが、絶対圧がマイナスなことにはないという考えに立てば、それらは実態のない負圧を計測していることになる。連続的に変化している土の水を分類するとすると、限られた情報下では概念的とならざるをえないのかもしれない。

突然今日的になるが、執筆中にいま話題にしている孔隙径の小さい埴質の土について、その物理的意義を失うとされた孔隙径約 $3\ \mu\text{m}$ の電顕写真を手にすることができた(写真)。この写真を見ると、あたかもオホーツクの流水を空から見ているようである。米塊のごとき粒子の間が、約 $1\ \mu\text{m}$ から $3\ \mu\text{m}$ の孔隙である。ロージェ風に考えれば、 $1\ \mu\text{m}$ 付近は結合水が土粒子同志を固く結んでおり、画面全体が流動性の少ないものになっている、ということになる。しかも結合水膜は $1\ \text{万}\ \text{\AA}$ であるから、水分子径を $3\ \text{\AA}$ とすると、それは水分子3000の厚さという膨大な量になる。

普通、土粒子表面に吸着されている水膜は10~20水分子層で、 $50\ \text{\AA}$ 程度のごく薄い例の電気的二重層を構成していると考えられており、その薄い層がイオン交換などの重要な役割を担っていることが、よく知られている。その情報を思い出して、この写真を眺めると、その薄い層は写真の動き難い多量の結合水のなかでどうなっているのかなどと、何かと不可解になってくる。この写真に見られる実態を追い求めれば、失われた物理性あるいは毛管上昇の限界などが、もっとリアルなものになるかもしれない。

懸垂水のいろいろ

毛管水帯の上には、いわゆる懸垂水帯がある。地下水の毛管上昇が及ばない最上位の土層で、作土に含まれる保水帯である。地下水の上下に関係なく保持されている水である。接合部集積水などはそれに当たる。また先述の図2の毛管水の動態も懸垂水のモデルと言えよう。降雨後、重力水が排除されて土に残っている水で、その多くは水分恒数からみれば圃場容水量に相当するもので、作物栽培にとって重要な水供給源である。

ロージェは自由水が局所的に止まっている実態をよく

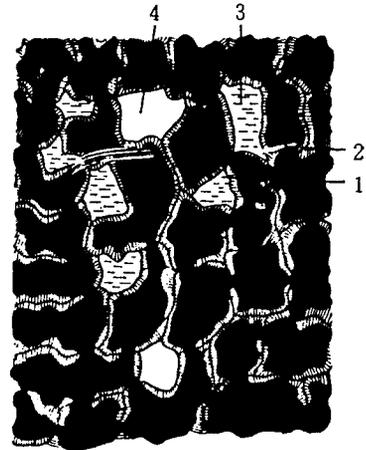


図-4 埴土の懸垂水

- 1: 土粒子または微細団粒
- 2: 土粒子表面の結合水の薄膜
- 3: 吸着閉鎖された自由水の微集積
- 4: 空の間隙

観察して、その保持の仕組みから4つの懸垂水に分類している。それは(イ)接合部集積水(ロ)薄膜水(ハ)団粒内毛管水(ニ)成層土層内毛管水である。(ロ)の薄膜水は、粘土が多くなると毛管上昇式が適合しがたくなることを念頭において描いた埴土のモデル図4から、推察できるものである。図のなかで2は結合水がびっしりつまった孔隙を示しているが、それが薄膜水である。また、3の印は結合水が毛管水の出口を塞いで、水を一杯溜め込んでいる状態を示しているが、これもまた薄膜水である。ルーペで覗きこみながら何かと想像して描いた水と思う。スケールが違うので単純には比較できないが、この薄膜水が先述の毛管水と結合水の関係を暗示している気がする。

図のように結合水が毛管水を取り囲んで封じこめれば、動ける水も動けなくなってしまう。とすると、見かけ上、毛管水も結合水となって、3000分子もの結合水膜があることになり、あるいは毛管上昇が止められたりするのかもしれない。ロージェはこの種の形の水に関心が強かったようで、その移動性に特に検討を加えている。例えば懸垂水は一般に移動性に欠けるが、しかし薄膜水は蒸発表面に向かって、ある限界含水量までは移動できることを、水分恒数の毛管連絡切断含水量との関係で論じ、他の懸垂水と別扱いにしている。よく考えてみたい。

(ハ)の団粒内毛管水は字のように団粒に保持されている毛管水である。最後の(ニ)成層土層内毛管水も、ロージェの関心の深いもので、粒子の粗い砂質土層の上に小さな粒子の埴質土層が重なっているときに生じる独

特な毛管水である。この場合毛管の下部のメニスカスは小さな曲率であるため、この下部に生じた上向きの表面圧は、下向きの上部のメカニカスの表面圧よりも大きい。そのため、2つの圧力の合力は上を向き、独特の水支持力になる。このようにして孔隙径の異なる空間に保持されているのが、成層土層内毛管水と名付けられた懸垂水である。ラプラス式と形の応用編である。

これらの懸垂水物語は、水のおかれた形と力の関係によって水を追求していたロージェの本領を發揮したものであろう。その類別と定量化に苦心していたロージェにとって、Hillel¹⁹のような批判は身にこたえるものであろう。すなわち「土壌物理学の初期において流行した“重力水”“毛管水”“吸湿水”などのように、土壌水を保持形態で分類してきた恣意的な範疇化は、ポテンシャル概念ですっかりおきかえられてしまった。水というものは土壌内において場所により、また時間によってどのように違っているのであろうか。それは“形態”が違っているのではなくて、そのポテンシャルが違っているのである。土壌水を分類しようと試みるよりも、そのポテンシャル・エネルギー状態を特徴づけることの方がより妥当なアプローチである。」という批判にロージェは歯軋りしていたに違いない。

なぜマトリックポテンシャルか

話をもどるが、では一体水分ポテンシャル学派は、結合水と毛管水の仕分けをどう考えていたのであろうか。もちろん水分ポテンシャルが個々の特別な水保持の機構と関係ないと言っても、水のエネルギー低下の要因を念頭においていることは、先ほどの毛管水帯の定義に“毛管ポテンシャル (ψ) をもつ力場”とあることから明らかである。この毛管ポテンシャルという用語は、遠い昔 (1907) Buckinghamがエネルギー概念を導入しようと試みたとき名付けたもので、当時“土壌中の単位質量

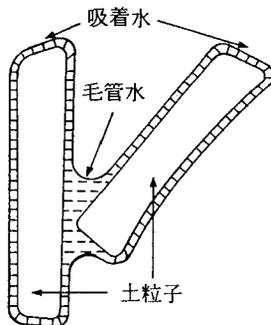


図-5 毛管現象と吸着の影響下にある不飽和土の水

の水を、問題としている点から自由水面まで動かすに要する仕事”と定義されたもの。仕事量とみることに毛管力が面力であることを力説する岩田²⁰に批判されているが、多くの視点からその後研究が進み、特に1960年代の輝かしい多くの研究によって水分ポテンシャルが今日の地位を築いてきたのである。その過程において、毛管ポテンシャルをマトリックポテンシャルと呼ぶことになったらしい。この呼称の変化に毛管水と結合水の認識を読み取ることができる。なお、ここでは結合水、吸湿水、吸着水を同義語とみなして話を進めたい。

図5はHillel¹⁹が吸着水と毛管水の関係を絵解きしたものである。粒子を角ばらせて示しているが、基本的には接合部集積水と吸湿水を一緒にした図であろう。つまり毛管水と結合水の関係である。2つの粒子が接しているところには、毛管による凹のメニスカスが描かれ、この部分では、接合部集積と同じメカニズムで水が保持されていることを示している。しかしその毛管水の端が、粒子表面を覆っている吸着水膜 (凸面) とつながり、両者が相互平衡状態にあることを指摘した図である。したがって片方を他方に影響を及ぼさずにそれぞれを変化させることができないので、毛管ポテンシャルという一方にかたよった呼称をやめて、マトリックポテンシャルと呼び名を変えたという。つまりマトリックポテンシャルは土の孔隙と粒子表面とを含む土の全マトリックスに対する水の親和性に起因する総合的な効果を表している。もともと毛管現象と吸着が一緒になってマトリック吸引圧を生ずるものであるから、両者の仕分けは無意味ということになろうか。このようにして起因の毛管力と結合力の関係はマトリックポテンシャルの名に置き換えられている。したがって凹凸のメニスカスの相互関係、つまり正圧が負圧の足を引っ張るのか、あるいは高めるのかなどは、この図からは視覚的には理解できない。

水分ポテンシャルの普及に力があつたのは、古くから開発されていたテンシオメータであったと思う。引き合う力、張力 (tension) あるいは張力水 (負圧水) を測る器械という名前であろう。原理は簡単で、ポーラスカップを土に埋めこみ、その付近の吸引圧によってポーラスカップの中の水が出入りし、それと等価的に変化するゲージ圧によって土のマトリックポテンシャルを求めるものである。この方法によってpFや吸引圧の数値が畑の水の動態について、多くの貴重な情報を提供し、また水分ポテンシャルを身近なものにしてきたと思う。

しかし、こうして求めたpFや吸引圧は、具体的な土の孔隙の形やその径などを示しているのではなく、それはあくまでも水のエネルギー状態を示したものである。その数値は土の水保持力の内容を直接示すものでないこと

は、マトリックポテンシャルの用語の由来にもみられるように、自明なことである。

このような事情を考えてか、国際土壌科学会のマトリック吸引圧の定義は「土壌水に働く外部気圧に相対的な負のゲージ圧で、土壌溶液と組成が等しい溶液が、土壌中の水と多孔膜を通じて平衡するために加えねばならない圧力である」となっている。明らかにテンシオメータを意識した定義であり、利用価値の高いテンシオメータにふさわしい定義である。言ってみれば、血圧計に示された圧が血圧である、という話のような気がするが、しかし水を非圧縮性とみなすと、マトリックポテンシャルは土の水の圧力に等しいという考えに裏打されているものである。つまり、マトリックポテンシャルは負の圧力ポテンシャルでもある。このように何かと言い換えが多く混乱するが、言い換えは思考の枠を広げるもので、科学の一つの重要な方法論ではある。

平衡の活用

立場によっていろいろの表現があるが、一つの共通した認識として土の水の化学ポテンシャルが、標準状態よりもどれだけ低下しているかを示したのが、水分ポテンシャルとみてよいようである。例えば毛管ポテンシャル(ψ)は、岩田⁷⁾によれば、毛管の凹面形成によって生ずる化学ポテンシャルの低下量($\Delta\mu_c$)と定義されるものである。それを符号で表すと、 $\Delta\mu_c = \psi = 2\sigma/r \cdot V$ となる。ラプラス式に示されるメナスカスによる負圧をエネルギー単位に換算したものが毛管ポテンシャルである。

ところで“毛管力の場合はそれ独自で存在しうるものではない。それは重力の場が存在し、それとの平衡が達成されてはじめてあらわれる場であり、ポテンシャルなのである。もし無限につらなっている土壌柱の下端を自由水面に浸す時、重力の場のないところでは、水は永久に上昇運動を続け平衡は達成されない。もちろんそこには毛管力の場合も ψ も生じえない”という、重要なプリンシプルについて岩田⁹⁾は発言している。この視点によればpFや吸引圧表示の水柱高 h は下向き重力ポテンシャルと平衡している反対方向の $-h$ を指しているもので、同じくラプラスの式を使いながらも、常識的な毛管水を水がはい上がるイメージの毛管水の説明といささか違いがあることに留意したい。

このような巨視的視点のもとに、外圧と外力場に影響される土の水の化学ポテンシャルについて、それを規制する条件との関係について微視的に岩田は追求しているが、そのなかに結合水と毛管水の境のことも含まれてい

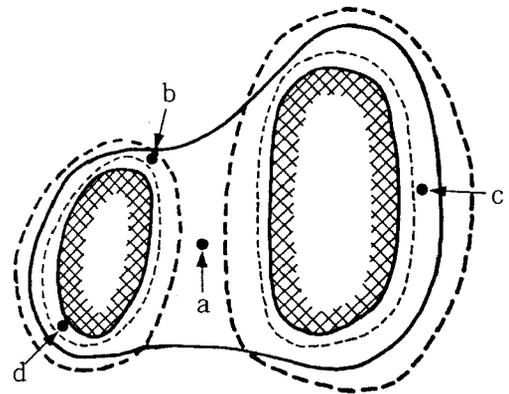


図-6 水分分布と化学ポテンシャル

る。またそこに、水分ポテンシャルがなにを表現しようとしているかを読み取ることができる。例えば岩田は1.重力 2.毛管現象 3.溶質との相互関係 4.土壌粒子と水分子の相互作用 5.(4)の相互作用の場によって生ずる静水圧 6.外力と外力場 7.温度の7要因が化学ポテンシャルを規制しているという。

1の重力はポテンシャル発現の源であり、2の毛管現象は毛管ポテンシャルそのものである。3は浸透ポテンシャルといわれるもので、溶質の存在によって水の化学ポテンシャルが低下することである。溶質が水を束縛するのである。一見自由そうに見える海水も、含まれている塩類によって著しく化学ポテンシャルが低下して、極めて不自由な水であることを思い出したい。現実の土の水分ポテンシャルは主として2、3の両者が加算されたものである。4以下の幾つかの関係については、岩田が、引用したEdlefsenの図6^{7,9)}を説明しながら次のように解説している。

図は、基本的にはHillelのマトリックポテンシャルの図と同じであるが、ここでは、状態の異なる水の幾つかの領域(相)を視覚的に示している。そして、系が平衡状態にあれば、その化学ポテンシャルはすべての相において等しい、という例の化学ポテンシャルの基本的な特徴を演繹的に生かして絵解きしている。いま図の系が平衡である限り、水分ポテンシャル、つまり化学ポテンシャルの低下量($\Delta\mu$)はどの部分でも同じになる筈である。そのため図のなかの各点を中心にした領域の $\Delta\mu$ はすべて同じであるが、それは次ぎのように符号化して記すことができる。なお図の破線は、電場のポテンシャルが一樣でない領域を、点線は分子間力のおよぶ範囲を示している。

1. $\Delta\mu = \Delta\mu_c + \Delta\mu_o$.
2. $\Delta\mu = \Delta\mu_p'' + \Delta\mu_e'' + \Delta\mu_i'' + \Delta\mu_o''$.
3. $\Delta\mu = \Delta\mu_p' + \Delta\mu_e' + \Delta\mu_o$.

1は点aを含む破線と凹面によって囲まれる領域の化学ポテンシャルの低下が、毛管ポテンシャルの低下 ($\Delta\mu_c$) と浸透ポテンシャルの低下 ($\Delta\mu_o$) の和によること、2は粒子表面に近い点dの領域では毛管ポテンシャルが姿を消し、内部圧によるもの ($\Delta\mu_p''$)、電場と分子間によるもの ($\Delta\mu_e''$) ($\Delta\mu_i''$)、それに浸透ポテンシャルの低下 ($\Delta\mu_o''$) が加わって低下すること、3は1、2の中間に位置するc点を含む領域の化学ポテンシャルで、それは2と異なる内部圧 ($\Delta\mu_p'$) と ($\Delta\mu_e'$) に加えて、1と同じ浸透ポテンシャルの低下 ($\Delta\mu_o$) によることを示している。

つまり平衡系で、すべての部分の $\Delta\mu$ が一定に保たれていることは、もし $\Delta\mu$ が変化した場合には、毛管ポテンシャルや浸透ポテンシャルの変化のみでなく、電場や分子間力が卓越しているところでは（これらは負の毛管ポテンシャルや浸透ポテンシャルと異なり正圧）、それらのポテンシャルが変化して $\Delta\mu$ を一定に保っている、ということである。

また毛管ポテンシャルの優先している1の領域の化学ポテンシャルは、同時に2や3の結合水優先の領域のポテンシャルと同じである。つまり1の化学ポテンシャルは2や3などすべての相を含めた土・水系の水分ポテンシャルを代表するものである。このことを広く言えば、テンシオメータがpF2を示したならば、そのテンシオメータが感知した土の化学ポテンシャルは、他のどの部分もすべてpF2に相当するポテンシャルの水ということになる。このような形で結合水と毛管水の関係が記述されよう。

岩田⁹⁾は精密な実験と理論によって、粒子結合水の化学ポテンシャルを水膜の厚さとの関係で求めている。それによると水膜が水4分子層から1分子層に減少すると、減少に応じて水の化学ポテンシャルが急激に低下している。粒子に近い水分子ほど強く引き付けられていることを物語っている。しかし、これは水分量の減少によって変化したものであって、例えば水が充分にあるpF2の土の粒子表面にも、そのままこの化学ポテンシャル勾配が存在している、とは言えないのではなからうか。この考えが正しいとするなら、ロージェの仕分けた4つの懸垂水などは、エネルギー的にみて現実的にはあまり意味がなくなろう。

いま、作土に幾つかの種類の懸垂水が混在しているとき、そのポテンシャルがpF2であったとすると、変化

するポテンシャルの内容が異なっても、薄膜水、団粒内毛管水などといった、どんな形の懸垂水でもpF2に相当する化学ポテンシャルの水であり、水の形によるポテンシャルの特徴は表に出てこないことになろう。したがって水分ポテンシャルは形を越えたもので、形はどのようなものでもかまわない。Hillelが“形態”が違っているのではなくて、そのポテンシャルが違っているという、まさにそれに符合した話である。

概念と現実

しかしながら懸垂水帯では、各懸垂水が水蒸気相を通じて連絡してはいるが、毛管水帯と異なり水理的な連絡に欠けていると思われる。このような系が、熱力学的平衡あるいは定常状態にあると考えることは無理であろう。そのため不均一な多相系の統一的な理解に最も優れている平衡と化学ポテンシャルの概念も、適用には限りがある。平衡でなければ、計測した一つの水分ポテンシャルが各種の懸垂水を代表するものではなくなる。そのような場合には、当然ながら水のエネルギー状態を規制している土の微細構造に基づいた水の分類が重要な情報となる。水は器に従っているのである。

微細構造といえ、例の有名なヒステリシス現象がある。各pFや吸引圧に対応する水分含量を求めた吸引圧—水分含量曲線は、土の水分特性を水分ポテンシャルによって示す重要なデータである。しかしこの実験には、条件が吸水過程か脱水過程かによって、水分ポテンシャルと水分含量の関係が異なることがある。これがヒステリシス現象である。主として土の微細構造に由来すると考えられるが、この現象のために土の水分含量が同じであっても、測定条件によって吸引圧が異なり、ときには測定値が10倍にもなることがある。

言うまでもなく、水分ポテンシャルが水分の物差しとして生かされるためには、吸引圧と水分含量の関係が土によって一定でなければ困る。しかし実態はそうではない。同じ水分含量でありながら、測定条件によって異なった平衡状態を示す奇妙な話。やむをえず、実験の都合もあって、乾燥させながら測定した水分特性曲線を物差しとしていることが多い。しかし開放系の畑は、乾くことと湿ることが錯綜しているため、乾燥物差しを使い方は難しい。水分ポテンシャルに批判的で、水分ポテンシャルを意味する吸引圧という用語を使わなかったロージェは、このヒステリシスを大きな難点として批判している。

このように考えてくると、土の水を現実にはそって形から分類していく学派と、熱力学的視点でエネルギー状態によって分類する学派が互いに論じあった問題の多くが、

まだ未解決な状態にあるということになる。しかしながら、両派の論争によって土の水の認識が高まってきたことも事実であり、その認識のなかで一般には、水の形の知見と水分ポテンシャルの知見を、これまた試行錯誤のなかで定着している水分恒数を接着剤にして頭のなかでドッキングさせ、土の水を矛盾なくイメージしていると思う。ただし例えば、古くから精力的に追求されてきた粒子表面に強く接合している水の存在を疑う人はいないと思うが、その結合水がマトリックポテンシャルのなかに概念的に埋没されることなどに抵抗を感じる人もいよう。これらの疑問を話し合うことに意義がある気がしてならない。

研究は進む (あとがき)

水分ポテンシャルは複雑多様な土の水をその形を考慮することなく、一連の数値として記述できる優れた物差しである。しかしロージェは、その至便さが同時に欠陥になると危惧していた。それは簡便なるが故に研究者の関心を“土壌水分の行動の根底に横たわる現象と過程の本質を知る”ことからそらさせてしまう。つまり土のもろもろの複雑な現象の追求が、数値化された水分ポテンシャルによって、おろそかになることを心配していたのである。

しかし幸い、ロージェの危惧は単なる危惧に終わったようである。20世紀の後半には、土壌学者の探究心が調査・研究手段の進歩とともに衰えることなく、ますます旺盛になり、ロージェの意を体したごとく、水の形、すなわち、マクロとミクロにわたる土の構造の解明と水の動態についての情報が著しく増大している。とくに、研究当初から土壌学の関心事であった水の移動についての情報は、その最も困難な孔隙の定量化への挑戦によって真に豊かなものになってきている。SchofieldがpFを提言した論文にも、土の水移動が砂土では毛管水の移動として理解できるが、粘土が増えて埴質な土になると、その理解が困難になることを明らかにすることが研究の背景にあることを述べている。ロージェが水の形とその分類にこだわったことも、基本的には水の移動の解明にあった。土の水の移動法則が明らかにならなければ、土の水のコントロールはできないのである。

水の移動の研究を困難にしているものに孔隙の不均一性があるが、1980年代に入り、コンピュータの画像解析による孔隙形解析、孔隙の実態に基づく数値モデル解析などの研究によって、ひび割れや根跡孔などの不均一極まりない土の孔隙と、その水移動についての情報がより確実に把握されてきている。いずれの研究も実際の土の

孔隙形の詳細な追求に基礎をおいているもので、CTスキニングの適用も試みられる時代になっている。これらの成果は成岡の総説²⁰⁾にその全貌が簡潔に紹介されている。もしロージェが読んだとしたら、感激したに違いない。

ロージェは実測した土の孔隙率に相当する孔隙形のモデルを、粒子の球状モデルによってまず作り、土の孔隙は気まぐれにとじあわされた、ふしの多い糸からできている3次元の網のようなもの、と表現している。しかしこのモデルの孔隙と自然土壌のそれとは、まだ共通性が少ないと嘆いている。その共通性を求めて、懸垂水などのいろいろな形が提案されたのであろう。現在、その困難な孔隙の実態の解明が著しく進んだのであるが、その際水分ポテンシャルが妨げになったことはなく、むしろ水分ポテンシャルによって研究が促進されたのである。この近年の大きな研究の流れのなかで水分ポテンシャルの普及に力のあったpFが、思想が純水を対象にしていたことや、正圧の表示ができないなどの理由で役割を終えて姿を消したことは、歴史の一駒であり、もって限すべきことかもしれない。

最近、一見ランダムと思われる雲の形などの記述に大きな力となっているフラタル次元を、Hatano, et al.^{11,12)}は土の複雑な孔隙やその水みちなどの記述にとりこむことを試みている。土の水の研究には決定論者ラプラスの式とともに、平衡を前提にした熱力学の化学ポテンシャルが大きな力となったのと同じように、非線形科学の一つであるフラクタル次元の導入が土壌学の発展にとって画期的なものになることを期待している。包括論者のGregory Bateson¹³⁾は次のように述べている。「芸術も、宗教も、商業も、そして睡眠までもがそうだが、科学もまた前提の上になっている。しかし科学では、思考のたどる道筋が科学者の立てる前提によって決まる、というだけではない。現在の是非を問い、非ならば破棄して新しい前提を造ること。科学的思考のたどる目標はそこにある。この点において科学はその他の人間活動と大いに異なる。」

草稿を読まれ貴重なご意見をいただいた茨城大学岩田進午教授、並びに北海道大学波多野隆介助教授に記して謝意を表します。

引用文献

- 1) R.K.Schofield: The pF of the water in soil, Transactions of the International Congress of Soil Science, .2, 23~48, 1935
- 2) N.C.Brady: The Nature and Properties of Soil, 8th ed. pp164~199, Macmillan Publishing

- Co.,INC.New York,1974
- 3) 川村一水：土壌学講話, pp115~136, 養賢堂, 1934
 - 4) A.A.ロージェ：土壌と水, pp7~56, 山崎不二夫監訳, 東京大学出版会, 1963
 - 5) D.Hillel：土壌物理学概論, 土と水の科学, pp46~76, 岩田進午監訳, 養賢堂, 1976
 - 6) 八幡敏雄：土壌の物理, pp35~70, 東京大学出版会, 1975
 - 7) 岩田進午：水分ポテンシャル, 植物栄養土壌肥料大辞典, pp386~390, 編集高井ら, 養賢堂, 1976
 - 8) 岩田進午：土壌水分の熱力学的研究, 土肥誌, 60, 271~273, 1989
 - 9) 岩田進午：土壌水のエネルギー概念について, 土肥誌, 32, 572~580, 1962
 - 10) 成岡 市：土壌粗孔隙の形態と、その測定法、土壌の不均一性と物質移動の研究最前線, 土肥誌, 64, 90~97, 1993
 - 11) R.Hatano, et al. : Evaluation of the effect of morphological features of flow paths on solute transport by using fractal dimensions of methylene blue staining pattern. Geoderma, 53, 31~44, 1992
 - 12) R.Hatano and H.W.G.Booltink : Using fractal dimensions of stained flow patterns in a clay soil to predict bypass flow. J.Hydrology, 135, 121~131, 1992
 - 13) G.Bateson : 精神と自然, pp33, 佐藤良明訳, 思索社, 1982

(受稿年月日 1993年8月27日)