

土壌水のエネルギー概念pFの工学的検討

竹中 肇*

これまで農学の分野で発展して来たpF概念は、主として不飽和状態の土壌水の保持と移動の理解を深めるために大きい役割を果たしてきた。しかし今やpF概念は単に水の状態量に止まらず、土水系の状態量として種々の工学的課題に答えようとしている。この小論はpF概念の成立を歴史的にふり返り、これを工学的に正しく理解するための体系を具体的かつ平易に論及しようとしたものである。

1. 農学の分野におけるpF概念の成立

農学の分野における土壌水のエネルギー概念の源流をさかのぼるとBuckingham(1907), Gardner(1922)らの毛管ポテンシャル概念に到達する。不飽和土壌中の水を説明するために提出されたこの概念は、Thomas(1922)らの蒸気圧法、遠心法、Richard(1928)らの吸引法として展開をみせ、Schofield(1935)により具体的なpF概念として確立するに至った。同時代に全く独立にDerjaguin(1935)もpF概念を提出している。

このようにして成立したpF概念は農学分野において不飽和状態の水の保持と移動、作物根の水分吸収などの解析に大いに役立った。pF値を農学上の水分恒数と対

比させたのが第1表である。

pFの内容の正確な物理的記載は次のようになる(1)。

$$pF = \log(\mu_0 - \mu) \dots\dots(1)$$

$$\mu = (\partial G / \partial M)_p, \dots\dots(2)$$

ここで G: ギブスの自由エネルギー

M: 水のグラム数

μ : 土壌水のケミカルポテンシャル(重力場に対してなされる仕事量を水頭の単位で示したもの)

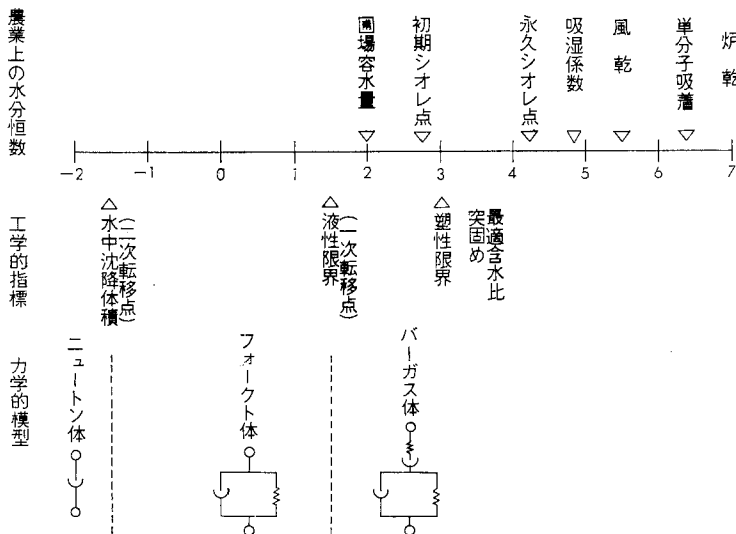
μ_0 : 基準状態の水のケミカルポテンシャル

ここでの基準状態としては普通は1気圧常温がとられるが問題とする土壌水の内容によって適宜、選ばれる必要があることを強調したい。すなわち圃場容量や初期シオレ点*などは溶質を含んだ土壌水の移動に関与する恒数であるから、pFを考えるときの基準状態としては溶質を含んだ自由水をとるべきである。しかし吸湿係数などを問題にすときには、水の移動は溶質を含みぬ水分子により行なわれるから基準状態として純水をとる必要がある。

またpFは熱力学的な平衡状態について定義される量であるから、土一水系のどの点をとってもその値が等しいことに注目しなければならない。

土粒子界面の水のpFは高く、それより離れた水のpFは低いというような考え方は根本的な誤りを犯している。pFの部分的不均衡を相補するため、溶質の移動や相圧の差が生じているわけで平衡状態のpFはすべての点で等しいと考えるべきである。

* 注: 初期シオレ点を遠心法により測定したpF水分と対応させてpF 3~3.8として定義する場合があるが、しかし正確にいうならば、このような場合、pFは固定的な土壌間隙内の水のエネルギー状態として定義されるべき性質のものであるので、テンションメータによる測定値と対応させるべきである。著者は陸橋、相橋などの水分吸収を現地圃場で実測し、初期シオレ点(より正確にいうならば生産制限水分点)としてはpF 2.7を採用すべきであると考えられる。



第1表 水分恒数とpF

* 東京大学農学部

現在のpF概念はその測定法を含めて未だ正しい理解と位置づけを与えられているとは云い難い。このような混乱に対処して、pFの内容を歴史的に考察し、これに正しい物理的位置づけを与えようと試みた岩田⁽³⁾の業績はあらためて評価しなおされるべきであろう。

2. 力学的作用による土の転移とpF

農学分野では土壌間隙を不変、固定のものと考え、この間隙内の水のエネルギー状態のみに着目してpFが定義されたことはすでに述べた。しかしpFは単なる水の状態量ではなく、土-水系の状態量として重要な意味をもつことが、Derjagin (1961) 須藤 (1963) 妹尾 (1965) らによって明らかにされるに至った⁽⁴⁾。

すなわち水中沈降体積状態より水分の少ない土は、ある応力状態に達すると塑性変形を起すことが観察される。分子レベルの粒から構成されている系では物質の転移点は圧力P一定の下で、温度Tにより規定される。しかし塑性変形でみられるように、土水系では温度Tが一定の条件下で、外力によりゲルがゾルに転移する現象を示すから、この系の状態量を外力により規定して転移点を定めることができることとなる。実際に土の含水量をかえて転移点のpFを測定した結果を第1表に示しておく。

なお当然のことながら、工学的な検討に際し化学ポテンシャルの基準状態としては溶質を含んだ自由水をとることは容易に首肯されよう。

物理的な転移の定義にしたがえば、水中沈降体積付近では含水比がわずかにかわると、強度が大きく変化して折れ点を示すので、水中沈降体積は二次転移点として定義せられる。またpF 1~2付近まで含水量を減少させると、強度は更に飛躍的に高まるので、この点は一次転移点として定義される。

また塑性限界や突き固め含水比の水分状態の土では土壌水の連続性が急激に不良になるから、強度の変化も不連続的になる。このときのpF値を遠心法により求めたpF水分と対応させると、pF 3~4であることが知られる。これらの点は農学上での土壌水の不連続状態を示す点であり、かつ一般畑作物で生産制限状態がみられるpF 2.7より大きい値を示しているのは、塑性限界や突き固め含水比を求めるときに外力により土がこね返され、pF 2.7以上の水でも連続水として作用するためである。

このような工学的な土の転移を考慮して、土の力学的模型をあてはめると、 $pF < -1.5$ では土水系はサスペンションであるので、ニュートン模型、 $-1.5 < pF < 1 \sim 2$ では土水系はミセルの相互接触により成り立ってい

るからスプリングとダッシュポットが並列に並んだフォークト模型が想定される。pF < 1~2以上ではフォークト要素ならびに蜂の巣構造を意味するマックスウェル体とを直列につないだバークス模型があてはめられよう。

転移はまた力学的な降伏条件、すなわち強さの問題である。すなわち強度を考えると粘弾性体としての土の理解が大切であるのみでなく、土の破壊条件を取扱うときには、二次元的なクーロンモル理論(1900)よりも3次元的なシュライヘルミーゼス理論(1920)が有効であることが須藤らによって示された⁽⁴⁾。

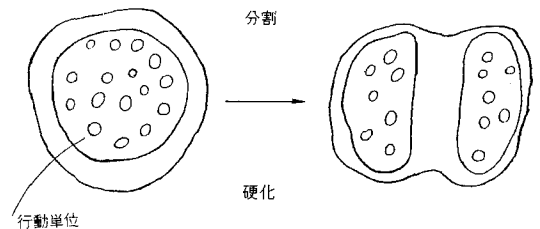
3. 土の軟化、硬化とpF

土工上においては、主として土の軟化現象が目玉され、鋭敏比、定格コーン指数として経験的に定義せられてきた。基礎の安定、施行機械の運行の難易を考えるとときには、土の軟化が重要であることは容易に理解しうるが、しかし土は外力を受けた場合、一方的に軟化のみを起すのではなく、時としては硬化を示す場合もある。土の軟化硬化現象はすべてpFの変化にもとずいて統一的に理解される⁽⁵⁾。

すなわち土の行動単位が、外力によって相互に接近する場合、pFの低下、土の軟化がおこる。(軟化)

一方、ねり返しによって行動単位内の水が間隙内に押し出され、pFの低下と軟化がみられる場合がある。(軟化)

ねり返しによって行動単位そのものが壊変をうける場合は、土壌構造の差異を反映して軟化や硬化がみられる。第1図に示したように、行動単位が細分されると



第1図 行動単位の分割による硬化

き、新たに生じた分割面に沿って、間隙水は拘束をうけるので見かけ上のpFの増大を生じる。(硬化)しかし、第2図に示したように、構造的に捕捉された水(構造的な非自由水)が自由化するときには軟化がおきる。(軟化)

又、含水量の少ない粗大粒子系が急激なヒズミをうけることにより硬化するダイラタンシ現象では、ねり返し注：ただしこの場合、軟化が観測されるのは、土粒子が親水性に富む場合で、疎水性の場合には、土粒子のかみ合いによる強度増加がpFの低下を上回り、土水系全体の力学的強度としては硬化の様相を示す場合もある。

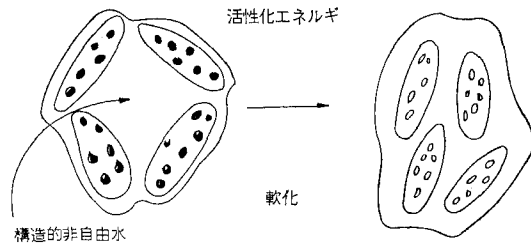
によりpFの増大がみられる。(硬化)

現実にはここで述べた諸現象が複雑にからみあっているが、これら軟化、硬化の要因を一括して第2表に示しておく。

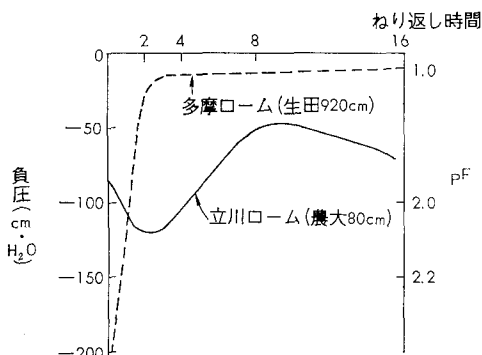
第2表

操作	ねり返し	放置した場合の可逆性
観測される現象		
軟化 (pFの低下)	1. 行動単位の接近 2. 行動単位内の水の自由化(チクソトロピ) 3. 構造的非自由水の自由化	おおむね非可逆 可逆 非可逆
硬化 (pFの増大)	4. 行動単位の離反(ダイラタンス) 5. 行動単位の分割	可逆 非可逆

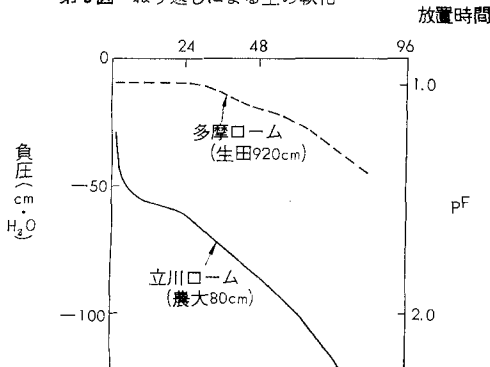
また関東ロームにおける土の軟化および硬化の実測例を第3図、第4図に示した。すなわち、関東ロームのうち



第2図 構造的な非自由水の自由による軟化



第3図 ねり返しによる土の軟化



第4図 放置による土の硬化

でも立川ローム層では、ねり返し当初では不攪乱状態よりpFは増す。これは行動単位の分割に対応するものである。しかしねり返しが更に進めば、行動単位の接近、行動単位内の水の自由化が進み、測定される pF は低下する。しかしねり返しがある限度に達すれば、再び行動単位の分割の効果が優先し、pFの増大がおこる。

しかし関東ロームのうちでも、生成年代がもっとも古い多摩ロームの土では、電子顕微鏡写真の観察によると、栗のイガ状の多数の突起をもつハロイサイトを主要な粘土鉱物としていて構造的な非自由水を多量に持つと推察される。したがってねり返しによる pF の低下はこれでの水の自由化に起因しており、しかも比較的短時間のねり返しで一定値に達する。しかしねり返し以前の土の構造には回復しえないから、放置した場合の pF の増大は立川ローム層の土ほどはかばかしくはない。

4. 土の収縮挙動とpF

土質工学においては、水分を減少させたときの体積変化は古くから注目され、収縮常数(すなわち、収縮限界、収縮比、体積変化、線収縮)は土の分類や路床土の適性判定、凍上性の推定に用いられて来た。しかしこれまで収縮挙動の理解には pF 概念の導入はなく、単なる量的把握のみが強調されたきらいがある。

pF を土水系の状態量としてとらえるならば、これは降伏値と深い関連をもつことが知られる。たとえば土塊の水分を次第に減少させてゆくとき、見かけ上の土の体積変化が起きるpF値は、(pF₀と略記)、内部応力により定義される降伏値に等しいと考えることができよう。したがってこのときの値を不攪乱土およびねり返し土と比較すれば、これによって土の鋭敏比を土壌水のエネルギー指数から解明できることとなる⁽⁶⁾。一例として第3表に関東ロームおよび赤黄色土における測定例を示したが、関東ロームではいちじるしい強度低下がおこること、そのうちでもとくに施工機械の運行が困難であっ

第3表

	関東ローム			非火山灰土
	立川ローム (農大80cm)	武蔵野ローム (生田350cm)	多摩ローム (生田920cm)	赤黄色土 (静大 40cm)
不攪乱土のpF ₀	3.3	3.4	2.3	3.0
ねり返し土のpF ₀	2.2	2.2	1.0	2.3
不攪乱土のpF ₀ の真数	13	16	20	5
ねり返し土のpF ₀ の真数	10	10	7	10

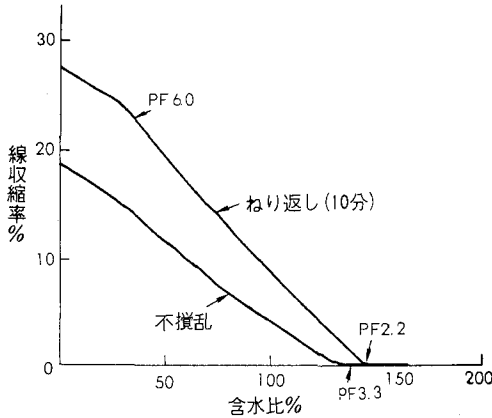
た生田920cm(多摩ローム層、チョコレート色の土)の激しい軟化の様子をよく示していると云えよう。

た水分を変化させつつ収縮量を測定すると、この収縮曲線が、土水系の構造や強度とよく関連していることが理

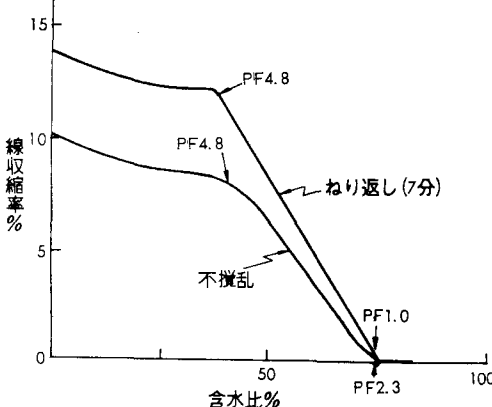
解される。すなわち親水性の大きい立川層心土(生土)では、高 pF に至るまで大きい収縮が続くが、これは行動単位間の粗間隙の水 (pF₀-4.2) がなくなってからのちも、行動単位内で土粒子に溶媒和している水が脱水するためである。しかし疎水的な性格をもった赤黄色土や、同じ関東ロームであっても結晶化が進んでいる多摩ロームでは pF が 4.8 付近に増大すると収縮は停滞し、収

化曲線ともよい対応を示している。すなわち親水性の高い立川ローム層心土では剛性率は 10⁸ dyn/cm² (pF 換算 5 付近) に至るまで、水分減少にともない順調に増大する。しかし疎水的な性格をもつ中川流域の水田心土では剛性率はすでに 10⁶ dyn/cm² (pF 換算 3 付近) で水分減少にともなう剛性率の増大は停滞する。(7)

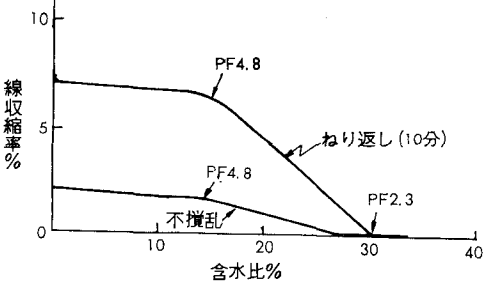
また収縮曲線で折れ点が認められる pF 値は土水系の



第 5 図 立川ロームの収縮(農大80cm)



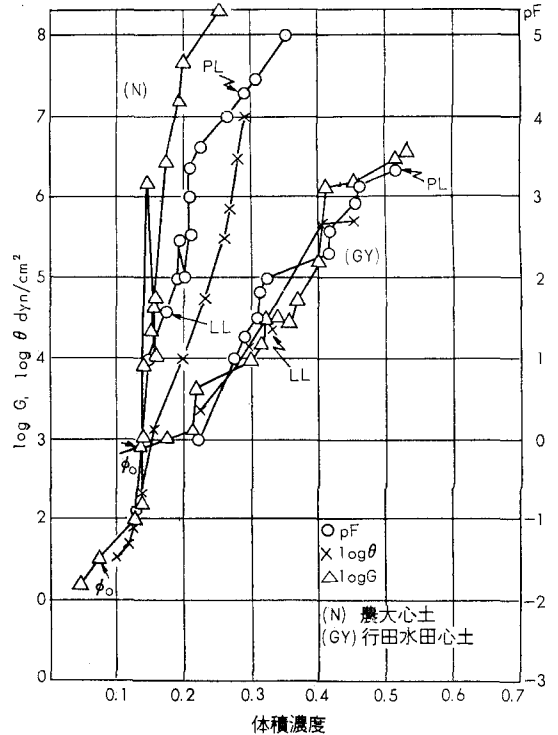
第 6 図 多摩ロームの収縮(生田90cm)



第 7 図 赤黄色土の収縮(静大40cm)

縮曲線で折れ点が認められるようになる。赤黄色土でも同様の傾向を示す。

この収縮曲線は、水分を変化させたときの剛性率の変



第 8 図 pF と log θ, log G の関係

緩和時間が著増する点に対応している。

5. 2.3の工学的性質とpFの関連

外力により土壌が変形を起したとき、微小変形を考えれば変化は弾性的である。系におけるエネルギー蓄積が、極限レジリエンスに達する瞬間、すなわち降伏値 θ に達する極限状態で系が示す水の自由エネルギーは近似的に系内に貯わえられたエネルギーに等しいと考えられる。(系内のエントロピーの生成を考えない。)したがって次の関係が成り立つ。

$$pF = \log(\mu_0 - \mu) \doteq \log \theta \dots\dots\dots (3)$$

pF 1 ~ 4 の範囲で種々の土壌につき pF, θ, G の関係を見ると、次の関係が成り立つ。(7)

$$\log \theta < pF < \log G \dots\dots\dots (4)$$

ここで G : 剛性率

液性限界以上の高含水比ではこれら 3 者の値はよく近

似する。

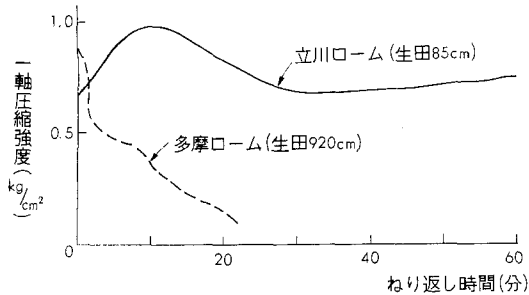
火山灰土のようなチクソトロピックな挙動を示す土では、降伏値を測定するときに、すでに構造破壊が起っているから、 $\log \theta < pF$ となっている。したがって θ と pF の関係を実験的に定めるには、チクソトロピ係数 k を導入して次式で示す。

$$\alpha \log \theta + \log k = pF \dots \dots \dots (5)$$

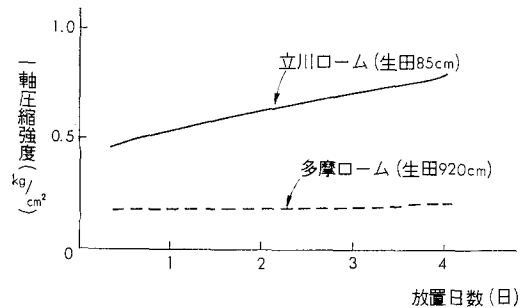
ここで α : 常数で 1 に近い。

モンモリロナイト系の土や、関東ロームでは k は 5 ~ 15 の値を示すが、ダイラタンシを示す土では $k < 1$ の値を示す。

第3図、第4図で pF がねり返しにより変化する様子を示したが、これら pF の変化と一軸強度の関係を調べ



第9図 ねり返しによる一軸圧縮強度の変化



第10図 放置日数による一軸圧縮強度の変化

てみると、両者で極めてよい対応を示すことが知られる。(6)

6. 問題点

pF の工学的検討はまだ緒についたばかりであるので、 pF 概念のみですべての土水系の挙動を説明できるという保証はまだ充分ではない。土の含水量が高い場合や親水性の大きい系に対しては、 pF そのものが直接土の強度に関連するが、含水量が少ない場合や疎水性の系に対しては、 pF のほかに土粒子そのものの配位による強度についても考えざるを得ないこととなる。現在まで種

々の土について得られた資料によると、 pF 3付近までは強度と比較的よい対応を示す場合が多い。しかし pF 3をこえると、強度との対応が必ずしも密接でない場合がある。とくに歴年の耕耘管理によって疎水の性格を強めている関東ローム表土などにその実例がみられる。これらの事実は、水の強さ (pF) のみでなく、土を構成している行動単位そのものの強さについても考慮すべきことを示しているものと思われる。目下、これらについて検討を進めているので別の機会に触れたいと思う。

また pF の測定法そのものにも多くの問題が残されている。特に遠心法についてはその内容が充分把握されないうまま、測定方法のみが安易に普及した傾向がある。(6) 遠心法により測定される値は単なる保水力の因子のみではなく、むしろ土の強度因子として取扱われるべき性質をもっていると云える。これらについても稿をあらためて論及したいと考えている。

7. むすび

土壤水のエネルギー概念 pF を歴史的に考察し、その内容を工学的に再整理した。これら pF 概念が、土の転移や軟化、硬化、さらには収縮挙動や力学常数の解明にきわめて有効で、これまでの農学上の水の状態量としてではなく、土水系の状態量としても適切であることを若干の実例について示し、現時点での問題点をあげた。〔謝辞〕 この小論は関東ローム土道研究会（代表者山崎不二夫教授）の共同討論と成果の中から生まれたものである。終始有益な助言を賜ったメンバーの各位に厚く御礼申し上げます。

引用文献

1. 妹尾学：土壤水エネルギー指数 pF による土壤構造の考察，農土論集14. P11~15, 1965
2. 竹中肇：下層土よりの水分補給を考慮した畑地カンガイ用水量，農土論集投稿中
3. 岩田進午：土壤水のエネルギー概念について，土肥誌32. P572~580, 1962
4. 須藤清次，東山勇，山崎不二夫：土のレオロジカルな構造，土と基礎437. P29~37, 1965
5. 竹中肇，安富六郎： pF の変化と軟化，硬化について，農土論集14. P54~59, 1965
6. 竹中肇：収縮挙動より見た土の工学的性質，農土論集14. P32~35, 1965
7. 安富六郎，竹中肇，須藤清次：工学的にみた土の剛性率，降伏値と pF について，農土論集14. P49~53, 1965
8. 山崎不二夫，安富六郎：遠心含水当量試験の問題点，土質工学会シンポジウム講演集，1965