

# 土 壤 の 粘 弾 性 挙 動

吉 田 力\*

## 1. ま え が き

Scofield の提起した土壤水のエネルギー指数  $pF$  は土壤の保持する水の量的な把握から質的意義づけが行なわれた<sup>1)</sup>。そしてこれは土と水の関係に着目して再整理され<sup>2)3)</sup>、土壤水の状態量から、ある限られた範囲内では土壤の状態量としての理解がなされ<sup>4)</sup>、土壤の粘弾性挙動、また強度特性と深い関係を持つものとして重視されてきている。作物の分野における  $pF$  の取り扱い、水分の吸収、養分、水の移動、乾燥の課題に応え、その適用範囲は広い。

一方土の力学的挙動を、クリープ、緩和現象から、粘弾性体として解析することは、土と水の関係をうかがわせる最も基本的な方向を与えるものといえよう。これらの現象の把握はいろいろ試みられ、そのモデルも提起され<sup>5)6)</sup>、土の挙動をレオロジカルな観点から追求するという新しい方向を示すものといえる。これらのモデルは大別して線型、非線型を示すものに分けられる。理論的には前者の考えがより取り扱いやすいという特徴はあるが、土そのものは本質的には後者の方がより実情に近い。ここでは土の粘弾性挙動を線型としてとらえ、充填による土壤の変化を加味しつつ、クリープ特性、 $pF$  と貫入抵抗の関係について若干述べる。過去のシンポジウムでとりあげられた問題については紹介程度にとどめることにする。

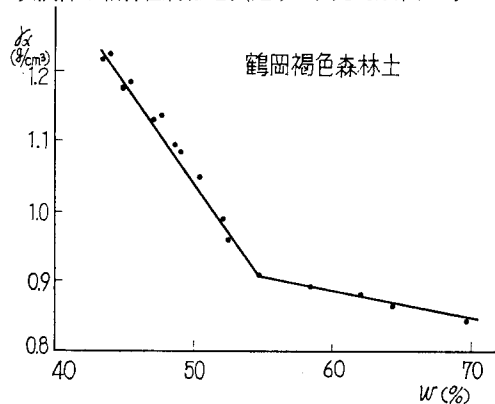
## 2. 力 学 的 転 移 点

土の場合の力学挙動は不連続な変化は考えられず、土粒子間をむすびつける水の状態量により決まる二次転移点とみなされる。ゾルとしての挙動を示していた高含水比の土は、含水比が少なくなると次第にゲル状を呈してくる。この状態を示す点、すなわち沈降体積の  $pF$  はおよそ  $-1.5$  とされ<sup>7)</sup>、コンシステンシー状態は液体から Voigt 体に変わる。次に LL (液性限界) についての  $pF$  の検討は<sup>8)</sup>、力学的転移点としてとらえられる。PL (塑性限界) は  $pF$  3 付近とされ毛管水の連続性がこの点を

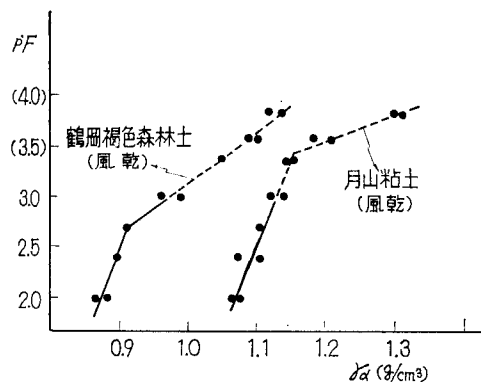
境にして問題となる。LL-PL 間ではパーガース体とみなされる<sup>9)</sup>。また JIS による最適含水比とこの点はほぼ一致するものとみなされ、生土、風乾土の締固め特性も明らかにされている<sup>10)</sup>。収縮限界は  $pF$  4.2 と考えられ、速度過程としての認識が指摘された<sup>11)</sup>。土の力学挙動を扱うさい重要な問題の一つである、軟化、硬化現象も  $pF$  概念に基づき説明された<sup>12)</sup>。このように  $pF$ 、レオロジーの導入により転移点をとらえると、土の特性の理解はより一層容易なものとなる。

## 3. 充 填 の 問 題

供試体の粘弾性特性を決定する大きな要因と考えられ



図一 (a) 遠心脱水と充填の関係



図一 (b) 遠心力による充填

\* 山形大学農学部

る土の状態量としての乾燥密度  $\rho_d$ 、含水比  $w$  の取り扱いについて考える。軟らかい土では、土壌の状態量は土壌水の状態量と等価になり得るものと考え、これを  $pF$  で論ずることが可能となる。しかし不飽和系の土では勿論、飽和系でも  $pF$  1.5 (実用的には2.0程度) 以上の固い土では土粒子間の摩擦による影響がより顕著になるものと考えられよう。

1. 遠心力による充填

図一1-(a), (b)はそれぞれの遠心力場で平衡に達した土壌の  $\rho_d$  と  $w$ 、遠心力と  $\rho_d$  の関係を示したものである。粘土鉱物、生土、風乾土によって若干のちがいはあろうが、 $\rho_d$ -遠心力の関係で一般には折れ点がみられ、遠心力により充填特性が異なるものと思われる。 $pF$ - $w$  曲線にはこの関係がみられずスムーズな変化をしている。このように充填という観点から遠心  $pF$  をみると、これは、側方拘束、排水自由、締固めエネルギーを変化させた特殊な締固め試験として利用することができる。遠心法については色々問題もあるが、実験が非常に簡単であるという特徴の故に、わが国では広く用いられ、その実用的な意義も検討されてきている<sup>13)14)</sup>。

2. 一定荷重による充填

JIS による突固めは衝撃荷重を用いているが、ここで

は静荷重による締固め特性について若干述べる。この方法によれば供試体のコントロールが比較的容易である。図一2は同一含水比の試料をモールドで載荷重を変えて求めた  $\rho_d$ - $\log$  (荷重  $P$ ) の関係である。ある範囲では、

$$\log p = a + b \rho_d$$

という直線関係が認められる。しかし  $P$  が小さくなると直線からはずれる。これはモールド内壁の摩擦による影響と理解され、含水比、 $P$  により異なる。図一3は飽和度と  $P$  の関係であり飽和度90~95%まではほぼ指数関係を示す。土壌の状態量は  $P$  により規定されることを考えると、土の力学的挙動を扱う場合、充填特性と  $P$  の関係は今後さらに明らかにさるべき問題である。

4. 遅延特性

1. 線型性の問題

土は一般に非線型挙動に示す。イニシャルセットの除去 (実験では荷重を瞬間的にかける)、歪硬化の概念の導入といった実験上の問題を克服することによって、限られた範囲内では線型として把握しようところみられ、新しい方向を示した。また粘弾性体としての土は熱レオロジー的単純性の仮定の導入により、温度-時間-周波数の換算則の成立が検討され、さらにこれは基準  $pF$  を力学的転移点にとることにより、その等価性が実験的に調べられようとしている<sup>15)16)</sup>。このような研究を可能にしたのは供試体作成<sup>17)</sup>も含めて実験技術が進んだためであろう。

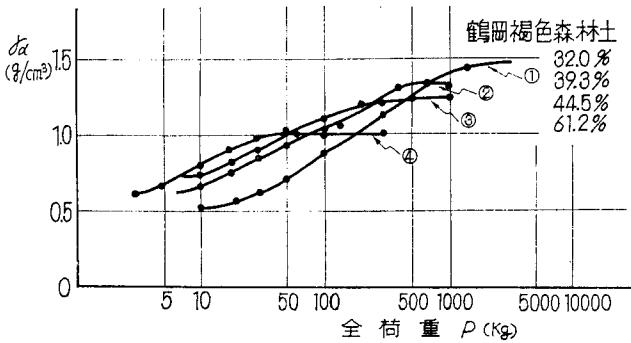
2. 土のスペクトル

土の粘弾性挙動をより基本的に把握しようとするには遅延、緩和現象に着目して整理することになる。そしてその解析にはスペクトル表示が便利である。土の遅延スペクトルは一般にクサビ型になり遅延スペクトルに基づいて土をパーガース体とおく近似の意味が明らかにされた<sup>18)4)</sup>。またねり返しによる遅延スペクトルの変化を水の自由化という観点からの検討<sup>19)</sup>、土の充填状態によるスペクトルの変化、くり返し荷重の影響等<sup>20)</sup>も検討され、かつ広い範囲にわたる測定の可能性も明らかにされた<sup>15)</sup> 図一4は  $\rho_d$  と遅延スペクトルの関係を示す。

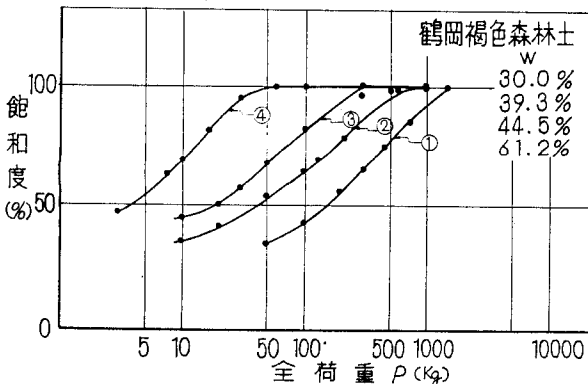
3. 貫入抵抗と遅延スペクトルの関係

スペクトルは供試体の状態に強く影響されるということは明らかであり、粘弾性特性を反映するものであるから、土の強度との間に一定の関係があることが推測される。ここで一定荷重で含水比を変化させた供試体についての貫入抵抗 (2.5mm貫入のCBR値) との関係を求めると図一5のようなほぼ直線関係がみられた。

5. 貫入抵抗と  $pF$



図一2 静的締固め



図一3 飽和度-荷重

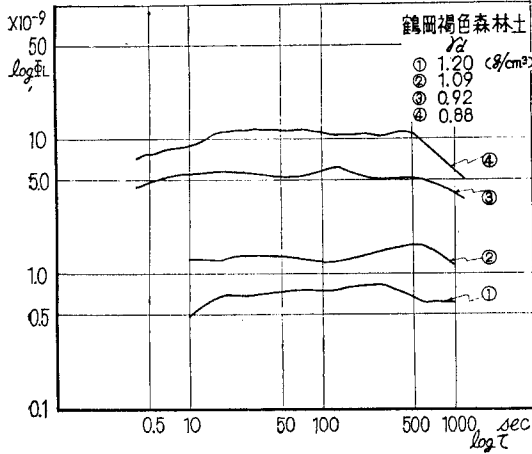


図-4 遅延スペクトル

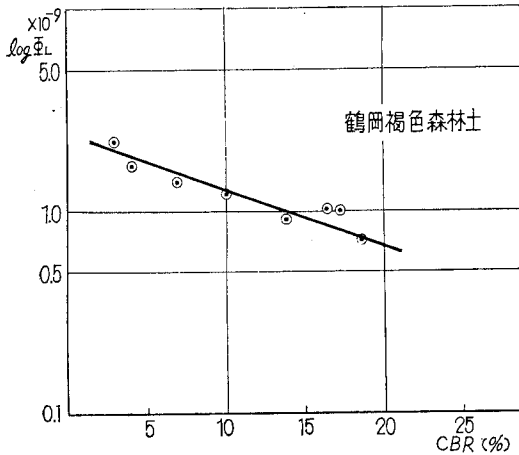


図-5 CBRとスペクトル

pF と強度の深いつながりは、降伏値、一軸強度、コーン指数、支持力など強度試験の結果の理解やその対応をめぐっているいろいろな pF 領域でとりあげられてきた<sup>21)22)</sup>。貫入の問題は貫入のメカニズムが複雑であるので、経験的な値として主に用いられてきたが、この理論的な検討も、土壌の物理特性と関連させながら行なわれている<sup>23)24)25)26)27)</sup>。ここでは先に述べた充填のちがいがどのように貫入抵抗に影響するかを、pF、 $r_d$  を中心に若干整理してみる。図-6は pF—log CBR の関係で、ある範囲では直線となる。これは締め荷重を一定にし、含水比を変化させた試料に関するものである。しかしこの関係は締め荷重の高含水比側からピークまでの範囲についていえる。また充填の方法が異なればこの関係はみられない。以上のように土の強度はある限られた範囲では土壌水の状態量 pF と良い対応を示すが、固い土では土壌の状態量である乾燥密度、すなわちそのよう

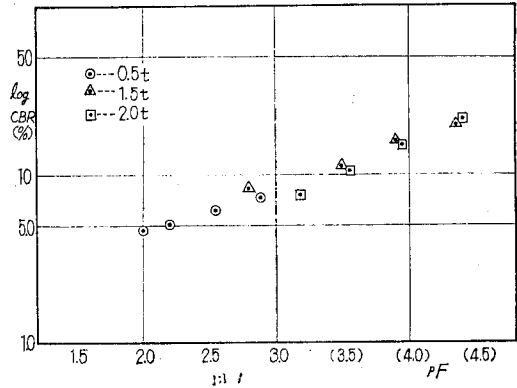


図-6 log CBR—pF

な密度を生じた原因である p に大きく影響される。

### 6. あとがき

土の粘弾性挙動を考える場合、力学的転移点は重要な意味を持つ。すなわち各点を境にして力学模型は異なり、このような理解が土の挙動を正しく把握することになろう。またこれは強度特性とも直接関係し、それは最適含水比、一般に pF 3 の点を境に著しく異なる。この点は毛管水の連続性が失われる点としても知られている。しかしこの値は対象となる目的により、それぞれ持つ意味が違ってくるであろう。すなわちここで若干とりあげた充填の方法によりその点の持つ意味は異なり、粘弾性挙動を扱う場合、特に重要となろう。

### 引用文献

- 1) 山崎不二夫・八幡敏雄・須藤清次：関東ロームの物理的性質，農土研別 7, 1—14 (1963)
- 2) 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 (1961)
- 3) 妹尾学：土壌水エネルギー指数 pF による土壌構造の考察，農土論集 14, 11—15 (1965)
- 4) 須藤清次・安富六郎・山崎不二夫：土の力学的性質および状態量について，材料17, 175 275—278 (1965)
- 5) 村山朔郎・柴田徹：粘土のレオロジー的特性について，土木論集, 40 1—31 (1956)
- 6) 須藤清次・東山勇・山崎不二夫：固い土の力学的性質，農土論集, 14 21—26 (1965)
- 7) 安富六郎：土壌のコンシステンシー，土壌の物理性, 11—12 9—23 (1965)
- 8) 徳永光一：pF 土壌水分系による土の物理的、力学的性質に関する二、三の研究，農土研, 25, 1号 18—24 (1957)
- 9) 東山勇・須藤清次：土の力学的転移点 農土論集, 14, 27—31 (1965)
- 10) 須藤清次・安富六郎：関東ロームの工学的特性，農土研別7 92—93 (1963)

- 11) 竹中肇：収縮挙動より見た土の工学的性質，農土論集 14 32~35 (1965)
- 12) 安富六郎：火山灰土壌の土工の諸問題 土壤の物理性，18, 36~44 (1968)
- 13) 須藤清次：遠心 pF とその測定法，土壤の物理性，22 35~40 (1970)
- 14) 中村忠春：pF 測定法について，研究の資料と記録，(16, 東大) (1967)
- 15) 東山勇・吉田力：土の緩和スペクトルについて，農土講演要旨，44 151~153 (1969)
- 16) 東山勇：土壌の力学的挙動，土壤の物理性，20 19~24 (1969)
- 17) 東山勇・吉田力：一軸強さに及ぼす温度の影響，農土講演要旨，43 240~242 (1968)
- 18) 須藤清次：土の力学的模型序論，研究の資料と記録，14 69~74 (1965)
- 19) 安富六郎・須藤清次：土のねりかえしによる遅延スペクトルの変化について，農土講演要旨，41, 24~25 (1966)
- 20) 須藤清次・東山勇・吉田力：土の粘弾性について，農土講演要旨，42 208~210 (1967)
- 21) 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 49~53 (1965)
- 22) 例えば，山崎不二夫監修土壤物理，養賢堂
- 23) 東山勇・須藤清次：土壌のコンシステンシー測定，土肥誌 37-1(1) 18~27 (1966)
- 24) 金須正幸：農業機械の走行可能性，土壤の物理性，14 10~15 (1966)
- 25) 吉田勲：コーン指数に関する 2, 3 の考察について，土壤の物理性，19, 3~8 (1968)
- 26) 新垣稚裕：農地の地耐力，研究の資料と記録，17, 43~56 (1969)
- 27) 吉田力：CBR 試験における二、三の検討，農土講演要旨，45, 157~159 (1970)

## 農林省登録腐植酸肥料

# フミン酸肥料懇話会

会員メーカー (ABC 順)

アツミン

日本重化学工業株式会社

東京都中央区日本橋小網町2-14(洋糖ビル)

フミゾール

北炭化成工業株式会社

埼玉県戸田市川岸1丁目1-20

エスコン

日本水素工業株式会社

東京都千代田区有楽町1-10(三信ビル)

テルナイト

帝石テルナイト工業株式会社

東京都渋谷区幡ヶ谷1-31