

## Atterberg Limits の工学的意義

## Interpretation of Atterberg Limits for Engineering

東 山 勇

## I はじめに

コンシステンシー (consistency) という語は、一般にやわらかい物体が、外力をうけたときの变形または流動に対して、抵抗する性質を評価<sup>1,2)</sup> するもので、物質の種類や目的によって、いろいろな測定法が考えられてきた。それらはいずれも簡便で実用的である反面、その力学的内容、すなわち弾性、粘性、塑性、降伏値、摩擦などの要素が、どのように組合わさっているか、あいまいな場合が多いことや、さらにまた、例えば応力が増大して降伏値をこえ、変形の様式が変わっても、これを同じ尺度で論ずるといった特徴は、実用的ではあっても、それ以上の発展や解析を阻むといった欠点にもなる。コンシステンシーとは、本来このようなものであるという理解と認識が、まず前提とならう。

土のコンシステンシー測定<sup>3)</sup> については、力学的な試験法のかなりの部分をこれに含めて考えることもできるが、普通はコンシステンシー状態を区分する Atterberg limits が中心にならう。ここでは、特にその中で、塑性領域の上下限を決める液性限界と塑性限界に焦点をしばり、一見、全然似ていないこの二つの試験法が、何故に上下限を決めうるのか、試験法の意義や、力学的な内容について検討してみたい。

## II 液性限界

## 1) ビンガムリミット

土-水系を pF スケールに沿って、低 pF から高 pF にみてゆくと、懸濁液の状態から、次第に濃度が濃くなってきて、最初に形を成しはじめるのが水中滞積の状態<sup>4)</sup> で、pF でいえば -1.5 附近といわれている<sup>4)</sup>。液体のときにはみられなかった降伏値が、ここでは弱いながらも現われる。もし定められた方法にしたがって、これを測定すれば、沈降体積 (sedimentation volume) であるが、レオロジー定数が大きく変化する力学的転移点<sup>5)</sup> であるから、ここで、コンシステンシー状態を区分すれ

\* 山形大学農学部

ば、ビンガムリミット<sup>6)</sup> (Bingham limit) となる。この濃度を  $\phi_0$  とすれば、降伏値  $\theta$  と体積濃度  $\phi$  の間には、

$$\theta = A \exp(\phi - \phi_0) \quad (1)$$

が成り立つ<sup>6,7)</sup>。

この場合行動単位は、一般には凝集した構造であろうが、理想化して単分散の状態とすれば、そこでは、土粒子の電気二重層による斥力と自重の平衡が実現し、 $\frac{1}{2}$  粒子間距離を水和層の厚みと考えるなら粒子間に自由水は存在しない。土粒子の比表面積  $S \text{ m}^2/\text{g}$ 、 $\frac{1}{2}$  粒子間距離  $d \text{ \AA}$ 、含水比  $w \%$  とすると土粒子  $1 \text{ g}$  当りで

$$w = \frac{W_w}{W_s} = \frac{S \cdot d}{1} \times 10^4 \times 10^{-8} \times 10^2 = \frac{S \cdot d}{100} \quad (2)$$

が成り立つ<sup>8)</sup> (図-1)。

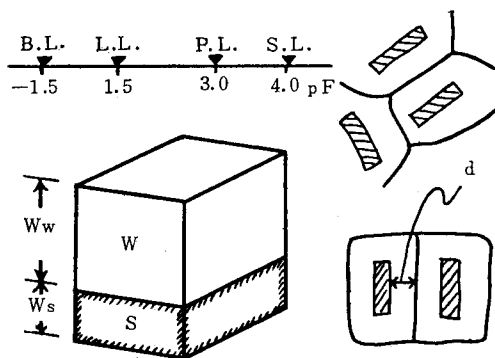


図-1 ビンガムリミットと含水比

実際には、行動単位は、単分散粒子ではなく、ミクロな粒団であるため、(2)式を直ちにビンガムリミットの定量的な計算に用いることはできないにしても、あとでのべるように、液性限界試験の高含水側での流動が、土壌ゲルの降伏による拘束水の自由化であれば、この関係は、定性的にはビンガムリミットはもちろん、液性限界をも支配するといえよう。例えば含まれる粘土鉱物が、モンモリロナイトのとき、カオリナイトよりも圧倒的に液性限界が大きいことや、同じ粘土鉱物でも、交換性陽イオンが1価の場合、2価に比べて大きいとか、その他

液性限界におよぼす塩類濃度の影響、温度の影響など、その理由を定性的には(2)式の中に見出すことができる。

### 2) 落下 25 回の意義

液性限界の意味を文字通り liquid との境とけとるならば、塑性体としての姿を初めてとるビンガムリミットが妥当であろう。しかしその降伏値は非常に小さいから、日常普通に経験する、手でおしたり、足でふんだりする程度の小さな外力で、いつも液化していたのでは実用にならない。そこでもう少し固いところが候補になるが、それに応える次の力学的転移点 (transition point) が液性限界である。pF でいえば 1~2 およそ 1.5 付近となる。落下回数と含水比の関係つまり flow curve を半対数でなく普通目盛にかければ理解しやすいことであるが、10 回以下の高含水グループと 40 回以上の低含水グループでは明らかになちがいがある。低含水側では、4~5 回程度の回数は、みぞのとじかたに対する判断のしかたで増減するが、高含水側ではそれだけちがえば大変なちがいである。この両グループの間で降伏値の飛躍的な増大がおこっているが、その中間をとれば 25 回程度が一応の目安となる。また一般に高含水側ではねり返しによる軟化をおこし易く、低含水側では逆に硬化をおこし易い。軟化は同一含水比で落下回数が増えるから、測点を左に移動させる。硬化はその反対でかたくなるから右に移動する。したがってねり返しすぎるような個人差も、幸い中間点をとることによって相殺され易くなる。25 回は単なるとりきめではなく、このような意味ももっているといえる。

### 3) flow curve の意味

前述の(1)式を少し書きかえてみる。いま、土粒子の体積  $V_s$ 、比重  $G_s$ 、乾燥密度  $\gamma_d$ 、間隙比  $e$ 、含水比  $w$  を用いると、体積濃度  $\phi$  は

$$\phi = \frac{V_s}{V} = \frac{1}{1+e} = \frac{1}{1+w \cdot G_s} = \frac{\gamma_d}{G_s} \quad (3)$$

であるから、降伏値のかわりに外力  $P$  で(1)式を書きかえると

$$\log P = a + b \cdot \gamma_d \quad a, b: \text{定数} \quad (4)$$

(4)式は(1)式の観点をかえて、外力  $P$  による充填系の密度と外力の関係を示すものとも考えられる。

容器にはいった粉末は、底をたたくことによって、より密に充填されることは日常経験することである。液性限界試験の場合も、土壌ゲルが降伏して自由化された水のために粒団間の気液界面のマイクロなメニスカスが変わり、平衡が破れて流動がおこるが、そのさい粒団は密に充填されてゆく。図-2は直径 5 cm のモールドにつめた試料を、一定高さから落下させて、充填の指標である

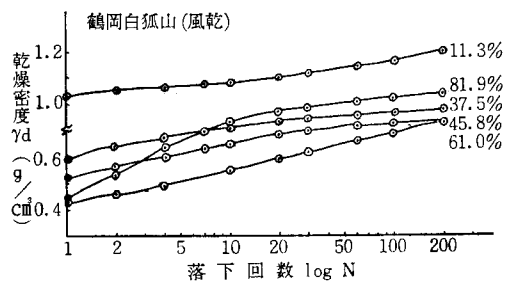


図-2 落下回数と充填

$\gamma_d$  と落下回数  $N$  の関係を示したもので、この例ではモールドは 1,400 g、落下高 5 cm で液性限界試験 (皿は約 180 g、落下高 1 cm) よりは大きな衝撃力を与えて充填効果をみやすくしている。一方同じ試料をジャッキを用いて静的に圧縮した場合の外力  $P$  と  $\gamma_d$  の関係を図-3 に示した。両者を対比すると明らかなように、充填に

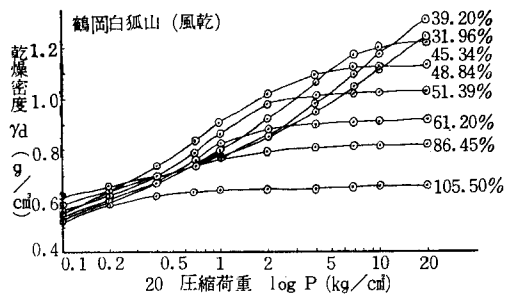


図-3 外力と充填 (一次元圧縮)

およぼす効果としては  $N$  は  $P$  と等価であるといえる。ところで(3)式に示すように  $\gamma_d$  は別の表現でいえば間隙比  $e$  であり、比重で割らざれば含水比  $w$  でもある。結局 flow curve すなわち  $w$ -log  $N$  曲線とは、 $e$ -log  $p$  曲線にはかならない。圧密試験で、ねり返して構造を破壊した試料については、 $e$ -log  $P$  曲線が直線となることは周知の事実である。圧縮指数  $C_c$  と液性限界  $W_L$  の関係についての Skempton の指摘や、圧縮試験との関係<sup>9)</sup>も、flow curve が  $e$ -log  $P$  曲線であるという理解にたてば了解されよう。

### 4) フォールコーンの原理

皿をたたく型式とは随分異なるようにみえるフォールコーンで<sup>10~12)</sup>液性限界がなぜ求まるのかという理由は、すでに前述の説明からも明らかであろう。落下回数の増加が外力の増加になっているのに対して、コーンは自重が定まっているから、貫入部の断面が増すにしたがって外力は減少することになる。こうして降伏値と平衡したところでコーンの貫入は停止する。この場合は貫入深さが外力の指標になっている<sup>13)</sup>。

5) ミゾ 1.5 cm 会合の意味

液性限界試験の落下回数は、公定法ではミゾが 1.5 cm 閉じたときの回数となっている。この意味を考えてみたい。皿の中の各微小部分について、 $\gamma_d, w$ , 飽和度を測定してみると最初のうちは隣接点どうしの値のパラッキが非常に大きい。しかしミゾが 1.5 cm 閉じるまで衝撃をくり返しているうちに平均化されて底部の充填は一樣になってくるのがよくわかる。局所的な流動をおこした落下回数をとらないところが、非常にうまい工夫といえよう。フォールコーンでは貫入部分が大きいということが、この点については幸いしているといえる。

III 塑性限界

1) 降伏と破断

物体は外力をうけると変形する。そこで外力をとり去って変形が再びもとにもどれば弾性変形、もどらなければ塑性変形をしたといい、その性質を塑性とよぶ。表現をかえれば、応力が増加して降伏点をすぎると歪だけが增大する性質で、降伏点を境に弾性が消え塑性が現れる。

例えば鉄やコンクリートのように、主に材料の強度を問題にするときは降伏値に着目するが、粘土細工のような塑像を作るときは塑性挙動の方に重点がおかれる。指で押して作った変形が、もとに復したのでは困ることは勿論であるが、この場合、指で押す程度の小さな外力で永久変形を残すような、つまり降伏値が小さいことが第一に必要である。さらに第二に重要なのは、降伏後の挙動である。降伏後すぐ破断するものと、破断の前駆過程としての流動が永く続くものとある。前者が脆性破壊 (brittle fracture), 後者が延性破壊 (ductile fracture) である。塑像を作るには、力をかけるとすぐひび割れるのでなく、どこまでも変形が続くような延性挙動をもつことが大切なことはいうまでもない。

塑性限界試験とは、試料をころがして圧縮引張りのくり返し応力を与えながら、破断にいたらせる破壊試験で、延性破壊をおこしうる最下限の含水比、つまりこれ以下の水分では、脆性破壊ばかり現われて延性破壊を期待できないような限界の含水比を求めるものといえる。一般に材料の脆性、延性は、応力、変形速度、温度により影響をうけるが、塑性限界試験では、手を用いるという最も簡単な方法で、巧みにこれらの影響をおさえ<sup>14)</sup>、そしてここでも、降伏値が飛躍的に増大する力学的転移点であることが、測定を容易にしているといえる。この pF の実測値は少しはばがあるが<sup>15,16)</sup>、pF 3 付近と考えられる。

2) 直径 3 mm の意味

塑性限界試験に用いるスリガラスの板は、表面の微細な凹凸によって吸水の役目を果たすと同時に、後でのべるような充填の促進に寄与している。ここでひもの表面と中心でいちじるしい水分や温度さらには充填の差を生じないためには、ひもの直径はなるべく小さい方がよいことになる。径が大きいと圧密脱水にも時間がかかるであろう。しかし一方、直径が小さければ一回の手の往復の間の回転数は多くなり、変形速度は増大する。歪速度が大きいと脆性破壊であったものも延性破壊にかわる<sup>14)</sup>ので、予定の含水比よりもっと低い値まで、きれることなくひものころがしが続く (表-1)。硬化が顕著に現われる土であれば、その効果も重畳される。その意味では直径は大きい方が望ましい。結局 3 mm は両者の間におちついた適当な値だと思われる。

表-1 塑性限界試験 八郎へドロ (風) 13°C

速さの程度	1分間のころがし速さ	歪速度 %/min	塑性限界 W <sub>P</sub>
おそい	45回	1.3	60.39
標準	80回	2.2	54.12
はやい	150回	5.1	46.07

3) 脆性破壊の機構

塑性限界試験は、ひもすなわち供試体をころがすことにより圧縮引張り応力を与え、圧密排水された水は、どんどん系外に持ち去るのであるから、ひもが細くなるにつれて充填が促進されていくことは容易に想像される。事実その通りで 図-4 に示すように、ころがり回数の増加と共に密度は増大し最密充填に達する。また間隙も、はじめは不飽和であるが、その直前で殆ど飽和度 100% に近いことがわかる。最密充填の系が外力をうけると体積膨張がおこる。いわゆるダイレイタンスーで、海岸の砂をふむと水が吸いこまれる現象は周知の事実である。脆性破壊はダイレイタンスーによる破壊と考えられる。

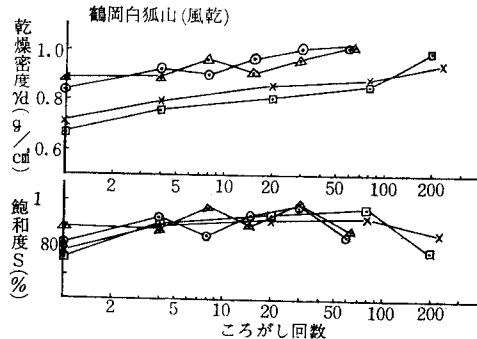


図-4 ころがしと充填 (塑性限界試験)

## 4) 最適含水比との関係

塑性限界の値が、締固め最適含水比に近いといわれている<sup>16,17)</sup>。このことは塑性限界が最密充填の含水比であることを考えると、むしろ当然である。ただしそのためには、締固めのランマーによる衝撃荷重と、塑性限界の手のひらで押しつけてその圧縮力とが、単位当りに換算したとき等しくなければならない。25 kg のランマーが、30 cm の高さから落下する迫力を思いうかべると信じがたいことではあるが、実際図-4の  $\gamma_d$  の値は締固めの最大乾燥密度の値に殆ど近いから、荷重のかけ方はどうあれ、力学的効果がほぼ近いことはまちがいない。手の圧縮力を測定してみると、個人差もあろうが 200~250 g 程度であった。破断時の面積で除すと最小 1.1 kg/cm<sup>2</sup>、最大 8.3 kg/cm<sup>2</sup>、おおよそ 2~5 kg/cm<sup>2</sup> が得られた。締固め試験は、定荷重で行なうから、これだけはあることは都合が悪いように思われる。ところが、実際は図-3で、どの曲線も P の大きい部分で横ばいになっていることからわかるように、飽和度 100% に近づくとつれて、P が増加しても、 $\gamma_d$  の増加はごくわずかであるため、その影響は殆どないことがわかる。図-3は特定の P における  $\gamma_d$  を、含水比軸にプロットしなせば、いわゆる締固め曲線になる。ここで飽和点以下では(4)式の関係<sup>18~21)</sup>が成立していることに注目したい。

## IV 塑性指数

## 1) 液性限界と塑性限界

液性限界では、ミゾキリでほったミゾが、形を保つには粒団間の気液界面のミクロなメニスカスが必要であった。しかし系は殆ど飽和に近く、衝撃によってゲルが降伏して流動がおきるときは、自由化された水でメニスカスの一部は消え、あるいは変化する。粒団間の距離が、せままることに着目すれば充填であり、外力をうけて系内から系外へ水がでる現象は、圧密でもあった。降伏値についていえば、飽和系から不飽和系にかわる状態変化が、その増大に寄与しており、土-水系が、連続体ではあるが、粗粒子系としての性格を強く現わすのもここからといえる。以上の記述は一部を手直すことによって、そのまま塑性限界にも適用できる。すなわちミクロを消し、衝撃をくり返し応力とよみかえることによって、そのまま塑性限界の説明としてもさしつかえないといえよう。

## 2) 塑性図

土の工学的分類に塑性図が用いられている。よく知られているように縦軸に塑性指数、横軸に液性限界をとると、同じ土層から出た土は Casagrande の A 線に沿

て分布する。また自然土もこれを生土のままです試験した場合に比べて、風乾すると A 線と平行に下降する<sup>22)</sup>。

塑性指数とは液性限界から塑性限界を差し引いた値であるから、塑性挙動に寄与する土粒子 1g 当りの水分量ということになる。A 線は、それが液性限界に比例するという主張であるから、そのこと自体はしごく当然のことであるが、ここで液性限界  $W_L$  そのままでなく、 $W_L-20$  となっている意味を考えてみたい。はじめのべたように液性限界は、もし粒子系が単分散であれば、 $\frac{1}{2}$  粒子間距離で土粒子を包む、土粒子 1g 当りの水分を示すことになるが、実際は粒団としての構造をもつ。そのため液性限界として測定される水量の中には死間隙 (dead volume) の水まではいることになる。次にのべる収縮限界が、ほぼこの死間隙に相当すると考え、しかもその値は施工の対象となるような土であれば大体 20% 程度であると考え、 $W_L-20$  は有効量とみてもよいのではなかろうか。塑性指数については液性、塑性の両方で死間隙が相殺されていることはいうまでもない。なお我が国の火山灰土壌の収縮限界には 50 に近いものも多く、そのことと  $W_L-50$  の D 線<sup>23)</sup> の提案とは暗に符合して興味深い。

## 3) 収縮限界

ここで収縮限界にも若干ふれておきたい。塑性限界で加える力が、もっとはるかに強大な巨人の手であれば、系が飽和から不飽和にうつる点は、さらにもっと低含水側に移るであろう。土壌水の蒸発によって生じた収縮応力とその外力となったとき、これを収縮限界とよぶ。もちろん塑性限界の場合に比べれば、今度は粒団の一部が破壊したり、粒子の配向<sup>24,25)</sup>が一そう顕著になる\* であろうから、同じ飽和系の充填といってもはるかに乾燥密度は大きい<sup>27)</sup>。ここでも変形速度は重要である<sup>28)</sup>。試料が均質でなく一様な応力を期待できなかったり、急激な温度変化や蒸発をさせたりすれば破断を生ずる。収縮限界を求める実験で、試料をよくねり合わせたり、収縮皿を強くたたいたりするのは、延性的な変形を期待するためになるべく構造をこわしたり、気泡を追いだすことによって一様性をはかろうとする努力と解すべきであろう。

## V 行動単位

## 1) 集合体の形成

収縮限界試験の途中の各水分段階で、鋭い刃のクサビ

\* 塑性限界のところでは特に配向の効果にはふれなかったが、もし試料が板状粒子であれば、それによる効果が大きいことはもちろんいうまでもない<sup>26)</sup>。関東ローム (アロフェン) でも塑性挙動はあるので配向のみによる説明はされた。

により試料を切断すると、切断に要する力はどうにかかわるかということは、破断のコンシステンシーともよぶべき興味深い問題である。周知のようにこれに類した試験が、Atterberg の創始による凝集力の試験で<sup>29)</sup>、圧縮試験が主流のかけにかくれたユニークな試験といえる。この方法では低含水になるにしたがって切断力が増大することはいうまでもない。しかし、もし締固め試験の供試体のようなものであれば、低含水領域では逆に切断力は大へん小さくなるであろう。前者が系全体にわたる連続した集合体を形成しているのに対し、後者は、個々の粒団はそうであっても、粒団間はすでにばらばらで粒団どうしのかみ合いや摩擦力、あるいは部分的な毛管力だけが抗力となっているからである。

乾湿をはじめもろもろの自然条件のもと<sup>30)</sup>で腐植なども含めた土壌の一次構成物質が、どのように集合して高次構造を作りあげているかを、記述することは容易ではない。しかし基本的には土壌の分散・凝集<sup>31,32)</sup>は van der Waals の引力と電気二重層の斥力とによって記述することができる。ところで液性限界など公定法では風乾試料を使うことになっている。土が湿潤から乾燥に向かう過程で、いろいろな問題があろうが、もっとも単純に考えても、電解質濃度の増加は電気二重層を縮退させ、その結果、土が凝集構造をもつにいたることは容易に想像しうる。そしてこれらの凝集構造の一部は、再び注水をうけると膨潤、スレーキングによる崩壊をうけるであろう。乾湿の過程と、水分状態つまり pF と、どのような外力をうけるかによって、その力学的挙動の行動単位がきまると考えられる。

## 2) 膨潤とスレーキング

土塊を水中に浸漬したとき崩壊する現象はスレーキングとして知られている<sup>33~36)</sup>。液性限界試験の公定法では、420 $\mu$  でふるった風乾土を用いる。注水で水の浸潤<sup>37)</sup> (infiltration) がおこるが、最初は粒団間のマクロな空隙に、さらに時間がたてば粒団の内部に水は浸入する。初期段階では浸潤の時間は、浸潤距離の二乗に比例する<sup>38)</sup>。水の浸入により膨潤<sup>39)</sup> (swelling) がおこる。そしてさらにそれによるスレーキングで試料は崩壊し、細粒化されてゆく。膨潤圧の測定では、水の浸入と対応する二つの段階をへるが、さらにそのあとにかなり長期にわたってわずかながら増大する第3段階がある。土粒子表面の完全な和水分完了するにはかなり長期間を要するのであろう。しかし第2段階までは、それほど時間を要しない<sup>40)</sup>、ねり返しはそれを促進する。注水、ねり返し合わせの時間が試験結果に影響を与える<sup>41,42)</sup>理由は、おそらく第2段階の終了をまたないで実験をすすめることと

関係すると思われる。また一度に多量の注水を行なうと、スレーキングで水の進路が閉塞、遮断され水分の不均衡を生じ、これがねり返しの硬化の原因ともなる。噴霧器により特に最初は徐々に注水することが推奨されているのはこのためであろう。

スレーキングとねり返しをうけて、液性限界試験の行動単位<sup>43)</sup>はどのくらいの粒団となっているのであろうか。図-5に試験後の粒径分布を示した。沈降現象を利用して体積%で表示したが、注水、ねり返しでかなり細粒

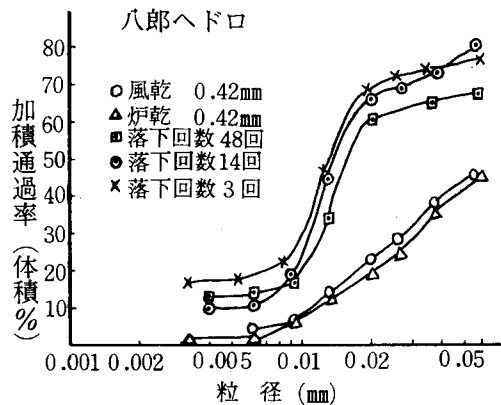


図-5 粒径—加積曲線

化していることがわかる。420 $\mu$  試料を少ししめらせた程度で10分間放置のものは、80%が200 $\mu$ であるのに対し、液性限界試料では50 $\mu$ となり、その行動単位はおおよそ50~5 $\mu$ であることがわかる。このようにみえてくると土粒子界面での土—水系の相互作用に加えて、粒団と水の、あるいは粒団間のマクロな挙動もコンシステンシーには重要であると考えられる。

## VI おわりに

Atterberg limits は、その測定が簡便であること、液性、塑性、固体などコンシステンシー状態の分類に供する規格試験として手順であること、などと相俟って農学、土木、築業など広く土に関する分野で用いられている。しかし半世紀以上もの長い間、これらが用いられてきたのは単なる簡便さだけの理由ではないであろう。Atterberg limits は本来、経験的なものではあるが、土のコンシステンシー状態を pF スケールに沿って整理するとき、これらはそれぞれ等温下での力学的転移点を示すものであるとの認識にたつてとりまとめた。そのため関連する問題<sup>44~47)</sup>のいくつかは割愛することにもなった。

〔謝辞〕これをまとめるにあたり、茨城大学教授、須藤清次氏の有益な示唆をいただいたことを感謝致します。

## 文 献

- 1) Reiner, M, (山田, 柳沢訳): レオロジーの基礎理論, コロナ, 127 (1962)
- 2) 高分子学会: レオロジーハンドブック, 丸善, 112 (1965)
- 3) 東山 勇, 須藤清次: 土肥誌, 37, 1, 18 (1966)
- 4) 須藤清次, 竹中 肇, 安富六郎: 農土研別, 7, 92 (1963)
- 5) 東山 勇, 須藤清次: 農土論, 14, 27 (1965)
- 6) 山崎不二夫 監 修: 土壌物理, 養賢堂, 209, 171 (1969)
- 7) 安富六郎, 須藤清次: 農土研別, 3, 40 (1962)
- 8) Yong, R. N., Warkentin, B. P, (山崎, 山内監訳): 土質工学の基礎, 鹿島出版, 158 (1972)
- 9) 伊藤 実: 農土論, 28, 7 (1969)
- 10) 筋内寛治, 五味貞夫: 土と基礎, 13, (10), 17 (1965)
- 11) 北郷 繁, 益田栄治: 土と基礎, 17, (9), 5 (1969)
- 12) 寺沢四郎: 土肥誌, 41, (6), 249 (1970)
- 13) 東山 勇, 須藤清治: 第11回土質シンポジウム, 57 (1966)
- 14) 東山 勇, 須藤清治, 吉田 力: 農土学会講演誌, 202 (1967)
- 15) 徳永光一: 農土研, 25, (1), 18 (1957)
- 16) 須藤清次, 安富六郎: 農土研別, 7, 98 (1963)
- 17) 文献 6), 90
- 18) 最上武雄編: 土質力学, 技報堂, 998 (1969)
- 19) 吉田 力, : 土壌の物理性, 24, 17 (1971)
- 20) 石井和夫, 徳永美治: 土肥誌, 42, (12), 447(1971)
- 21) 足立忠司, 竹中 肇: 農土論, 43, 26 (1973)
- 22) 山崎不二夫, 竹中 肇: 農土論, 14, 46 (1965)
- 23) 桑原 徹: 粘土科学, 9, (3), 12 (1970)
- 24) 素木洋一: セラミック外論, 技報堂, 62 (1962)
- 25) 素木洋一: 窯業の研究, 技報堂, 289 (1961)
- 26) Bayer, L. D. (野口, 福田訳): 土壌物理学, 朝倉, 120 (1955)
- 27) 東山 勇, 月館光三, 吉田力, 山崎加津子: 山形農林学会, 27, 74 (1970)
- 28) 竹中 肇: 農土論, 14, 32 (1965)
- 29) 土壌物理性測定法委員会: 土壌物理性 測定法, 養賢堂, 366 (1972)
- 30) レポート: 土壌物理, 農林水産技術会議資料, 54, 21 (1968)
- 31) 妹尾 学: 農業技術, 17, (5), 221, (7), 340 (1962)
- 32) 久保田 徹: 土壌肥料の研究第4集, 養賢堂, 37 (1973)
- 33) 八幡敏雄: 農土誌, 42, (2), 111 (1974)
- 34) 山沢新吾: 東京教育大農学部農土研報, 7, 1 (1956)
- 35) 佐藤晃一: 農土論, 28, 12 (1969)
- 36) 東山 勇, 月館光三, 吉田 力: 農土学会講演誌, 208 (1973)
- 37) 八幡敏雄: 農土誌, 41, (9), 615 (1973)
- 38) 前田 隆, Warkentin, B. P, : 土壌肥料の研究第3集, 養賢堂, 5 (1972)
- 39) 古賀 潔, 河野英一, 岩田進午: 土と基礎, 21, (12), 61 (1973)
- 40) 東山 勇, 月館光三: 農土学会講演誌, 250 (1974)
- 41) 土質工学会編: 土質試験法, 土質工学会, 97 (1970)
- 42) 安富六郎: 第11回土質シンポジウム, 69 (1966)
- 43) 東山 勇, 吉田 力: 農土学会講演誌, 262 (1974)
- 44) 久保田 徹: 土肥誌, 42, (1), 7 (1971)
- 45) 木下 彰: 土壌の物理性, 13, 13 (1965)
- 46) 国分欣一: 同 上 21, 21 (1970)
- 47) 吉田 勲: 同 上 21, 3 (1970)