

土壌物理におけるチキソトロピーの研究

安富六郎*・中石克也**

A Review on Thixotropic Researches in Soil Physics

Rokuro YASUTOMI and Katuya NAKAISHI

The Faculty of Agriculture Ibaraki University

1. はじめに

チキソトロピーとは“等温下でかきまぜたり、振りまぜたりすることによってゲルが流動性のゾルに変わり、放置すると再びゲルにもどる性質”である^{2,3)}。この現象は練りかえしによる軟化・硬化であり、可逆的であるかどうかはあまり問題にされない。農業的には犁による土壌耕耘時の牽引抵抗変化や、ブルドーザーによる切り盛り時の練りかえしが運土能率低下の原因と見られるが、機械の高馬力化や足まわりの改良によって、最近はその性質自身はあまり重視されていない。圃場整備における粘質土の取扱いや干拓地における土工、とくに暗渠施工時の練りかえしによる地耐力低下は施工管理上いまま重要である。侵食や雪解け後の軟弱化する土壌は圃場作業のみならず未舗装農道でも問題にされる⁵⁾。田植え機械と土壌の硬さについては土のチキソトロピー的性質と関係がある。

土壌物理では伝統的に土の透水性や保水力が中心的課題であり、必ずしもティルス (Tilth)、土壌硬度論、土性論から見た練りかえしの研究が進む条件にはなかった^{4, 22, 44)}。ここでは、土壌のチキソトロピーが土壌物理のなかでどのような位置にあったかを顧み、今後の展開の方向を探ってみた。

2. チキソトロピーの評価方法

(1) 流動の分類

Burgers と Scott Blair¹⁾によれば練りかえしによって生ずる軟化現象は、放置すれば再びもとの状態に回復

するが、より硬くなることが多いと言われている⁸⁾。チキソトロピーの発現は破壊と構造形成との進行速度によってきまると考えられる。したがって固化時間の差は観測時間、分散粒子の濃度によっても著しく変わる^{12, 34, 35)}。しかしその定量化は必ずしも客観的でなく、むしろ目的別に測定方法があり、相互の比較は困難なことが多い。

レオロジー的挙動の中には剪断速度に依存しない粘性率をもつニュートン流動と、剪断速度に依存する非ニュートン流動がある。非ニュートン体は流動系全体が剪断過程で硬化する剪断硬化体と軟化するチキソトロピー体に分けられるであろう。塑性体は降伏値をもつ流動であり広義のチキソトロピー体に含まれる。このチキソトロピー体にはレオベキシー挙動が含まれる。この流動を含むチキソトロピー流動が土壌の力学性を複雑なものにしている。

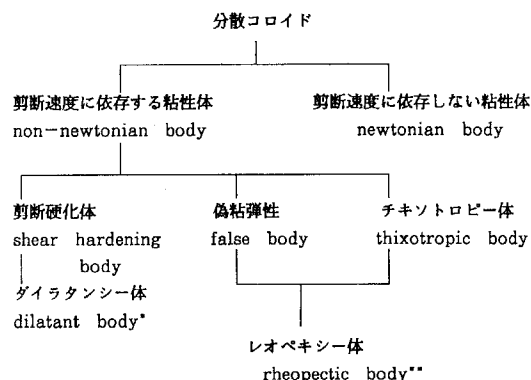
一般に分散コロイド系の流動に見られる軟化・硬化現象としてのチキソトロピー流動は図1のような位置づけられるであろう。

チキソトロピーの定量化については、多くの方法がある。例えば沈降体積、粘性変化、固化時間⁹⁾、降伏値³⁰⁾または Goodeveによるチキソトロピー係数³⁶⁾、Greenのヒステレシス・ループによるもの¹³⁾、Skempton³⁶⁾、Terzaghi⁴³⁾など⁷⁾のアッターベルグ限界を用いた液性指数によるものがある。多くの測定例からチキソトロピーの評価は基本的に沈降体積、アッターベルグ常数³⁾、降伏値および流動曲線による。

(2) 沈降体積

沈降体積は分散系の堆積構造を示す指標として用いられている^{1, 2)}。比表面積の高い粒子は沈降過程で凝集沈

* 東京農工大学連合農学研究科 〒183 府中市幸町3丁目5-8
 ** 茨城大学農学部 〒300-03 茨城県稲敷郡阿見町3998
 土壌の物理性 第60号 p. 28~33 (1990)



注 * 変形によって体積拡張して剪断抵抗が増す硬化現象
 ** かきまぜたり振りまぜたりすると凝集する硬化現象

図-1 コロイド分散系流動の軟化・硬化の系統

降し、かさの多い堆積を行う。これは、微細粒子が多いほど、また、凝集沈降を呈するものほど堆積充填構造が疎となり、内部構造の外力による破壊が容易に生じ、いわゆる構造粘性的となる¹⁴⁾。したがって、沈降体積 S_v はチキソトロピーと密接な関係がある⁹⁾。

Robinson²⁹⁾ は粒子の単位体積あたりの占める沈降の体積比 (cc/cc) で示される相対沈降体積 (relative sediment volume) S_v とコンシステンシーを示す比粘度 η_{sp} との関係を理論式としてつぎのように示した。

$$\eta_{sp} = \chi \cdot \phi / (1 - S_v \cdot \phi) \quad \text{---(1)}$$

但し、 χ : 常数、 ϕ : 体積濃度

この式はEinsteinの濃度と粘性の関係式と同様な内容を持ち、比粘性率 η_{sp} は $(1 - S_v \cdot \phi)$ で示される単位体積中に含まれる自由空間体積と ϕ で示される粒子の充填空間体積との比で決まる。White⁴⁴⁾ は沈降体積とアッターベルグ常数との関係をしらべた。また小野・渡辺²⁶⁾ は相対沈降体積 S_v と液性限界 LL の関係をつぎのような実験式で示した。

$$S_v = \frac{LL + ((100) / (\text{粒子の比重}))}{(100) / (\text{粒子の比重})} \quad \text{---(2)}$$

この式は S_v が LL の粒子のもつ水分吸着量 (膨潤量) の一次式で現すことができることを実験的に求めたものである。

(3) アッターベルグ限界

土壌学者アッターベルグは土のコンシステンシーを示す方法として水分量と土壌の粘着性がある範囲の水分領域で著しく大きいことに着目し、液性、塑性限界を定めた。この方法はチキソトロピー的な効果を含む測定法であり、自然状態の土壌含水比を導入することによって軟化の程度の評価ができる。

Terzaghiは液性指数 (IC) を用いて土の分類を行った⁴³⁾。

$$IC = (W - PL) / (LL - PL) \quad \text{---(3)}$$

ここで W は自然土壌の含水比、 LL と PL はそれぞれアッターベルグの液性限界、塑性限界である。 W が LL に等しいとき、練りかえしによって自然土壌が液性限界の状態になることを示している。このとき $IC = 1$ となる。これに対し練りかえしても自然土壌が PL 状態に保たれるものでは、 $IC = 0$ である。この IC 値が 1 以上でチキソトロピーが現れる。

開田または開畑して熟田または熟畑となるまでには少なくとも10年は経過しなくてはならないと言われている。開墾後、できるだけ短時間に熟化出来る方法が望まれるが、そのためには有機物含有量がきめてとなる。有機物には様々なイオンが含まれるが、その含有量が高まるにつれてアッターベルグ限界 LL 、 PL 値は高くなる²¹⁾。さらに交換性陽イオンとして Ca^{2+} 、 Na^+ 、 $F e^{2+}$ 、また陰イオン OH^- 、 SO_4^{2-} の濃度が高まればチキソトロピー的性質も高まる²⁶⁾。熟田化によって LL 、 PL が増加するものもこのようなイオンの存在によると考えてよいであろう。

(4) 降伏値

流動における降伏値とは、剪断力が増すと弾性体から粘性体となり流動するときの、応力である。したがってこの値は一種の相変化による力学的転移点であり、固体から液体になる軟化点を意味する。

Pryce-Jones²⁷⁾ はニュートン流動以外の非ニュートン流動を全て軟化・硬化現象として扱った。彼はポイントのチキソトロピーの評価に際し、試料攪拌後の一定静置時間における強度回復を一定のねじりを与えたトーション・ワイヤを試料に浸し、そのねじり角の戻りはやかに

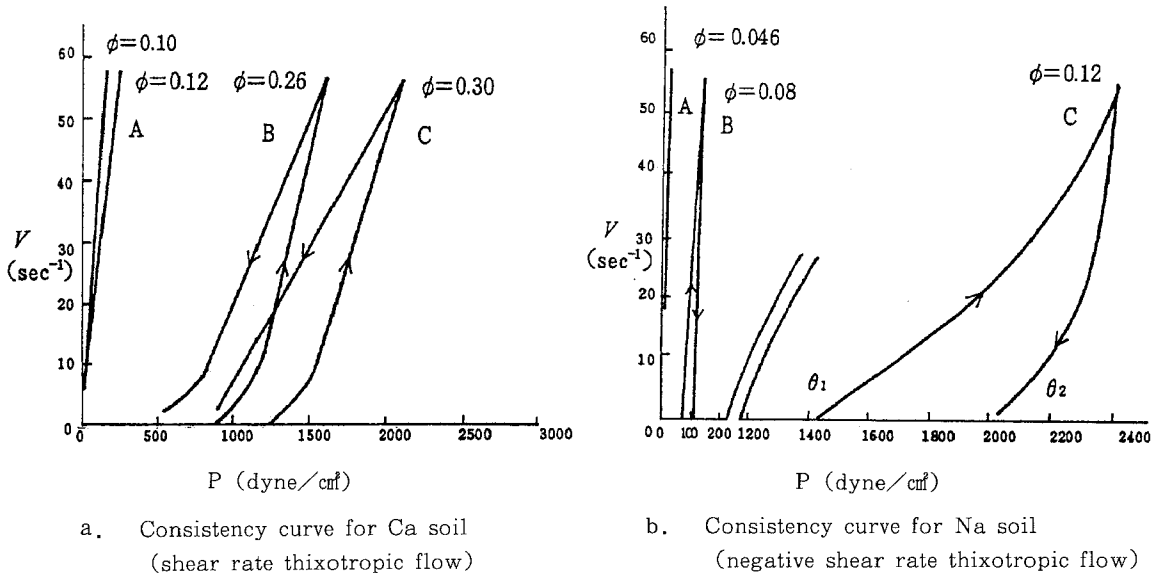
よって比較している。この方法は一種の応力緩和試験といえる。土壌の降伏値は通常、ベーン剪断試験、ねじり試験による測定が用いられる。これらは、いずれも原理的には同じと考えられるが、ベーン剪断ではかく乱による強度低下を弾性体から粘性流動に変化する限界値の測定によるのに対し、Pryce-Jonesの方法は粘性流動から弾性体へ変化する限界値を問題としている。かれの研究はペイント塗装の仕上がりを重視したので、軟化流動特性と強度回復時間が重要であった。

(5) 流動(コンシステンシー) 曲線

土壌のレオロジー特性の測定法として回転粘度計やクリープ試験によるものがある⁶⁾。土壌の粘弾性は、大変形または高濃度のサスペンションではビンガム流動体であるから、水田土壌の代かき状態における特性を調べるには回転粘度計が有利である。また、路床や地盤の沈下のように粘性の大きい変形解析にクリープ試験が用いられる。粘質土壌では力学的線形性は成り立たないことが多いので、土のように大変形の複雑な挙動の解析には線形挙動測定を基本とする測定(振動粘度計など)はあまり有効でない。土・水系サスペンションの流動特性は含有イオン濃度、サスペンション濃度によって著しく変化する。その程度は剪断速度と剪断力によって示される流動曲線(consistency curve)の囲む面積によって測ら

れる。面積変化の理論的考察は反応速度論や不可逆過程の熱力学にも興味ある領域を有している^{3,3)}。図-2に示すように、縦軸に剪断速度 V 、横軸に剪断力 P をとると曲線はA、B、Cと濃度が大きくなるにつれ、上昇曲線と下降曲線からなるヒステレシス・ループの面積はおおきくなる。チキソトロピー流動はざり速度チキソトロピー流動(shear rate thixotropic flow)と逆ざり速度チキソトロピー流動(negative shear rate thixotropic flow)に大別され、前者は図-2のaに示されるように流動過程によって軟化が促進する。図-2のbについて矢印方向に曲線をたどるとき、降伏値 θ_i についての最終値は初期値よりも大きい。このような特性をもつ土壌ペーストは攪拌時には見かけ粘性は低下するが、静止させると硬化し降伏値が増すことがわかる(逆ざり速度チキソトロピー流動)^{3,7)}。しかし、このヒステレシス・ループの面積は剪断速度 V の変化させる速度によって変わり、剪断速度 V の時間 t にたいする変化割合 dV/dt を規定しなければ、この面積の比較は出来ない^{20, 47)}。練りかえしの大きい条件では、土壌ペーストでは図-2のbのように逆ざり速度チキソトロピー流動となり、練りかえし後の降伏値が初期の値よりも高くなる。

田植えの土壌の性質はbのような特性を持つものがよいと考えられる。逆に、攪拌時に見かけ粘性が増加して



a. Consistency curve for Ca soil (shear rate thixotropic flow)

b. Consistency curve for Na soil (negative shear rate thixotropic flow)

図-2 第三紀に由来する粘土質土壌にNa, Caイオンを添加したサスペンションの流動特性⁴⁶⁾

- a. ざり速度チキソトロピー流動
- b. 逆ざり速度チキソトロピー流動
- φ 体積濃度

静止させると硬度（降伏値）が低下する土壌は田植え土壌としては不適な特性といえる。これがいわゆるダイラタント的な性質であり、砂質土壌のイツキの理由と考えられた。水田土壌の力学性は田植えと関係することは、すでに長田、山崎らによって報告されている⁴⁵⁾。

3. 土壌物理におけるチキソトロピー

この種の研究にはScott Blair による土壌の粘着性の研究³¹⁾がある。彼はブラウ抵抗の牽引と粘質土壌との関係を調べ土壌がうけた気候的变化の影響は土のもつ力学的性質に重要な影響を与えていることを実験的に確かめ、土のもつ軟化の性質を粘稠性(plasticity)の大小で評価した。ここでいう粘稠性とは荷重によって塑性変形を始める応力である。この“降伏値”によってチキソトロピーの程度が比較された。同じ水分でも降伏値の高い土壌は、寒く、かつ乾燥した気候状態にみられ、逆に湿潤で温暖な気候では降伏値の低いことが知られている。これは寒冷な状態で土壌が構造的に破壊される結果、粘土の水にたいする分散性が低下し、凝集的な構造再編によると考えられる。

チキソトロピーを示す土壌は構造が発達した土であり粒子間には結合の再形成が見られ、アルカリ土壌と関係が深い。ロシアの土壌分類によるアルカリ土壌の一つであるソロネツは特に構造が発達してチキソトロピー的な性質を示す。また熱帯湿潤地帯に見られる溶脱の進んだ弱アルカリ性のラテライトでは塑性の状況が溶脱の程度で異なると言われている³²⁾。

わが国のレオロジーはチキソトロピーの研究からはじまる。玉虫は粘土鉱物のチキソトロピー的な性質を研究し³⁰⁾、レオロジーをコロイド化学の分野に位置づけた。また、山崎、菱沼らの代かき作業の科学的意義についての研究^{16, 45)}では、土壌のダイラタンシーあるいは、チキソトロピーに類似する現象の重要性が指摘された(1954)⁴⁰⁾。さらに、土質力学の分野でも地盤沈下について、土のチキソトロピー的な性質¹⁸⁾との関係が示唆されている。水稻移植機の開発と性能試験が全国的に開始された1966年から水田土壌の力学性が注目されて、水田における機械の走行性と土壌の物理性の研究も行なわれた²²⁾。

(1) 代かきと田植機

1960年代の移植機の問題は欠株がときには30%にも達することがあり、その改善が最大の課題であった。移植された苗も土壌が柔らか過ぎると倒伏して生育できない。このような問題は水田の代かき状態、移植時の水深と土壌の物理条件によると考えられた。水田土壌は攪拌によって泥寧化し一旦分散して軟化するが、時間とともに

に、ち密な土壌構造になって硬化する。この状態では移植時に土は軟化するが、短時間に回復し安定したコンシステンシーを示すようになる。水田土壌の沈降体積から土壌構造の発達度を調べると、土壌の沈降高さが沈降時間によって減少する。さらにある安定な状態まで沈降したとき、上澄み除去して再度攪拌した後に沈降させると、沈降がさらに進み安定な堆積状態に達する。

藤尾ら¹⁰⁾は以上の沈降・堆積の性質をもとに、円筒状おもりの重量(荷重)と沈下深さ(変形)との関係をしらべ、荷重と沈下深さとの比を底面積で割った値を粘稠度(g/cm^2)とした。さらに、沈下が0である時の限界荷重を底面積で割って降伏値とした。この粘稠度と降伏値は、沈降泥より攪拌泥が、攪拌沈降泥より再攪拌沈降泥の方が、共に小さくなることを実験的にたしかめた。即ち攪拌沈降とさせた試料ほど攪拌することによって、容易にチキソトロピー的な性質が発現することを示した。沈降し堆積した水田土壌の上澄み除去しその土を攪拌すれば軟化してさらに凝集硬化が促進するが、より強いチキソトロピー的な性質が付加する。この性質を利用して、水田圃場の代かき後、落水させ、さらに代かきして沈降させた後、機械による移植を試みた結果、欠株は著しく減少した¹⁹⁾。

チキソトロピーの生ずる程度は懸濁液の濃度によって異なる。以上を流動特性からみると、懸濁液を攪拌すると、まず軟化現象がみられる。その後の回復過程では初期の硬さ(降伏値)よりも増加する特性を利用していることになろう。回復過程の硬化は懸濁液の濃度が大きいほど、また団粒構造の破壊が大きいほど顕著になる。水田土壌にはこのような逆ずりチキソトロピー流動特性の発現が移植時には必要であろう。

(2) 施工および耕耘

小橋ら²³⁾は干拓地水田土壌に施工するモグラ暗渠はトラクタの走行によってその殆どがつぶされる。彼はこの理由を土壌のくりかえし荷重による軟弱化であることを明らかにして、施工深さの検討を行った。

砂防や侵食について砂質土の表層崩壊の実験からマサ土の例に見られる表面流動すべりの運動特性はビンガム流動である²⁴⁾。このビンガム流動は滑動面を持ち、剪断面で生ずる強度低下は流動の速さや崩壊の規模に関係する。すなわち、初期の滑動のための荷重が大きいほど流動後の軟化は大きく、流動の速度や流動域の広がりも大きくなるであろう。

改良山成工法による火山灰土の土工運土過程でのスリップは作業能率に著しい低下をもたらす⁴¹⁾。このような練りかえしは土壌構造を壊し、土壌水分特性に大きい変

化を与える。練りかえしによるPF値の低下などが強度の低下を促す原因と考えられる⁴²⁾。

ブラウによる耕耘抵抗は速度に比例するが、土壌の性質によって複雑な臨界速度が現れる。この土の抵抗変化はあたかも液体における層流から乱流への変化に似ていることが指摘されている。この力学的な変化には土のチキソトロピーまたはダイラタント的性質が関係する³²⁾。ロータリー耕耘機の場合にも切削速度と全耕耘トルクとの間には土壌によって大きな差があり、粘土質では切削速度の増大で耕耘エネルギーが漸減する¹⁶⁾ことは土壌の軟化を裏付けている。

4. 今後の展望

地すべり、水食、トラクターの走行性、テイルスなどについての土壌の力学性の解析、および土壌分類などが土壌物理に関連する分野と考えられる。家庭用雑排水のコロイドなどを含む土壌浸透水の挙動は単純ではない。地すべりについては、土水系の含有イオンが浸透水とともに土層内のイオンと交換を行い、これが引き金となることもあろう。水食についても泥流のレオロジー特性がチキソトロピー的かダイラタント的かによって水食の加速の危険が高い土壌であるかどうかの判断基準が考えられる。

土壌中の塩分集積による力学性の変化をレオロジー的に見ることも土壌管理面から必要であらう。硬盤形成と土の力学性も今後の研究課題のように思われる。

文 献

- 1) 青峰重範、土肥誌, 17, 569-575 (1943)
- 2) Do, 19, 35-36 (1948)
- 3) Atterberg, A., Int. Mitt. fur Bodenkunde, 1, 10-43 (1911)
- 4) Baver, L. D., "Soil Physics", N. Y. John Wiley and Sons (1940)
- 5) Bodman, G. B., Robin, J., Soil Science, Soc. Amer. Proc., 13, 27-36 (1948)
- 6) Bodman, G. B. and Colmn, E. A., Soil Science, 68, 37-56 (1949)
- 7) Boswell, P. G. H., Quarterly J. of Geological Science, 104-499 (1949)
- 8) Brugers, J. M. and Scott Blair, G. W., Joint Committee on Rheology of the International Council of Scientific Union, Proc. Int. Rheol. Cong. Amsterdam. (1948)
- 9) Frundlich, H., Schmit O. und Lindau, G., Kolloid Beihefte 36, 43-81 (1932)
- 10) 藤尾福蔵、土壌の物理性、31, 9-13, (1975)
- 11) Gabrysh, A. F. et al, Trans. Soc. Rheology v. 67-84 (1961)
- 12) Green, H., "Industrial Rheology and Rheological Structure" p45, John Wiley and Sons, N. Y. (1949)
- 13) Green, H. and Weltmann, N., Ind. Eng. Chem. Anal Chem. Ed. 15, 201 (1943)
- 14) Hauser, E. A. "Silicic Science" p34-37, van Nostrand Co, N. Y. (1955)
- 15) 菱沼達也, "私の農学概論" 農文協 (1973)
- 16) 松尾昌樹、山形大学農学部紀要、3、4、583-591 (1961)
- 17) Moony, M., J. Colloid Sci. 1, 195-208 (1946)
- 18) 森 麟、土木学会論文集、57、7 (1958)
- 19) 中江克巳・藤尾福蔵・木村勝一、農業機械学会東北支部報 14, 35-41 (1965)
- 20) 中石克也、粘土分散系のチキソトロピー、農業土木土壌物理研究部会 (1988)
- 21) 小橋英夫・長堀金造・種村親志、岡山大学農学部学術報告 33、89-93, (1969)
- 22) 小橋英夫、土のチキソトロピーに関する土性論的研究 (未刊行)
- 23) 小橋英夫・長堀金造・荻野芳彦、岡山大学農学部学術報告 32、75-85. (1968)
- 24) 小橋澄治・今井重利・草野国重、新砂防79, 6-12, (1971)
- 25) 国分欣一、土壌の物理性、21, 21-27 (1970)
- 26) 小野宗三郎・渡辺武彦、日化会誌, 74, 436 (1953)
- 27) Pryce-Jones, J., Kolloid Z. 129, Heft 2/3, 96-122 (1952)
- 28) 理化学辞典 岩波 (1981)
- 29) Robinson, J. V., J. Phys. Colloid Chem, 53, 1042-1056 (1949)
- 30) Scott Blair, G. W., Physics 4, 113-118 (1933)
- 31) Scott Blair, G. W. and Yate, F., J. Agric. Sci. 22, 639-646 (1932)
- 32) Scott Blair, G. W. and Markus Reiner, Agricultural Rheology, Routledge & Kegan Paul, London. (1957)
- 33) Seno, M., Bull. Chem. Soc. Japan, 39, 7, 1401-1406 (1966)
- 34) 妹尾 学、農業技術 17, 5, 221-225 (1962)
- 35) DO, 17, 7, 340-343 (1962)

安富・中石：土壌物理におけるチキソトロピーの研究

- 36) Skempton, A. W. and Northey, R. D., Geotech, 3, 30-53 (1963)
- 37) 須藤清次・安富六郎、土肥誌、34 (8) 296-308 (1963)
- 38) 玉虫文一、日本化学会誌61, 280 (1940)
- 39) 玉虫文一、56, 778 (1935)
- 40) 玉虫文一、“代かき”の問題と土壌研究、科学、24、6、303-304 (1954)
- 41) 竹中 肇・山崎不二夫ら、農土論集 (14) 71-76 (1965)
- 42) 竹中 肇・安富六郎、農土論集 (14) 54-59 (1965)
- 43) Teruzaghi K., Proc. First Int. Conf. Soil Mech. 1, 161 (1936)
- 44) White, W. A., Am. Mineral (1949)
- 45) 山崎不二夫“シロカキの研究”金原出版 (1959)
- 46) 安富六郎・須藤清次、農土研別冊 3、40-45 (1962)
- 47) 安富六郎、粘土懸濁液におけるチキソトロピーの力学的解析の一手法、“火山灰と土壌” 219-223、(1983) 博友社
- 48) 米田茂男、土壌の物理性 No2, 24-28 (1960)