

資 料

土壌クラストの形成機作とそれに影響を及ぼす諸条件

田中 樹

Mechanism of soil surface crusting and some conditions affecting it

Ueru Tanaka

Faculty of Agriculture, Kyoto University

(Soil Phys. Cond. Plant Growth, Jpn., 71, 17-21, 1995)

1 はじめに

土壌クラスト (Soil crust: 土壌皮殻、土膜) は、土壌表面に形成される堅密な薄層構造と定義される。なお、降雨や灌水の塗上の薄層形成による目詰り現象をシーリング (Sealing)、その後乾燥過程を経て形成されたものをクラストと呼び分けることがある。

土壌クラストは、その程度の違いはあれ畑土壌では普遍的に見られる現象で、世界各地の農業者や研究者に古くから知られてきた。例えば、19世紀の後半にインド北西部を旅行した英国人が残した文献に、パンジャブ地方の伝統的畑作農業で土壌クラストの破壊を目的とする畜力牽引具が使用されていたことが報告されている (Randhawa, 1980)。土壌クラストの研究は、1930年代後半から始まり、様々な角度からの知見が蓄積され現在に至っているが、今なお検討すべき課題が数多く残されている。

本報では、筆者がこれまで行ってきた土壌クラストの形成機作とそれに影響を及ぼす諸条件の研究の紹介を織り混ぜながら、これまでの知見や問題点を総論的に整理し、今後の研究展開の指針を探る。

2. 農業および土壌保全への影響

土壌クラストは、堅密な薄層部分で僅か数mm程度の厚さに過ぎないが、その影響は作物栽培や土壌保全の様々な局面に及ぶ。

1) 作物栽培および表土管理への影響

発芽阻害: 土壌クラスト形成による直接的な影響は、幼作物の発芽 (芽伸び) の妨害である。これは露地畑に限らず、苗床や施設栽培での灌水でも経験され、播種から出芽までの間に、土壌表面が強い降雨や灌水を受け、その後の乾燥で固結したときに問題となる。乾燥時の収縮

京都大学農学部 (606-01京都市左京区北白川追分町)

キーワード: 土壌クラスト、形成機作、表土管理

性が大きい土壌では、クラストに亀裂が入るため、発芽した幼作物がそれを持ち上げるように伸びるが、収縮性に乏しい土壌では、作物がクラスト層を破ることができず、発芽率が著しく低下する。綿花や種子の小さいミレット類などの栽培では深刻な問題である (Lal, 1986)。本邦に於ても、北海道美瑛町の大豆作での事例報告 (横井ら, 1989) がある。

雨水貯留機能の低下: 膨軟に耕起された耕地でも、ひとたび土壌クラストが形成されるとその透水性が著しく低下し、 $10^{-4}$ cm/secから場合によっては $10^{-6}$ cm/secのオーダーにまで達する。降雨条件や土壌のクラスト形成に対する感受性にもよるが、わずかに降雨機会の前半 (十分分~数時間) に土壌表層の孔隙が閉塞し、滞水や表面流去水の発生が観察されることがある。透水性低下の問題は、土壌侵食との関係の中で扱われることが多いが、一方で耕地の雨水貯留機能の低下を招き、作物生育への直接的な影響も大きい。特に、集中豪雨的な降雨が多く、その周期の変動も大きい亜湿润~半乾燥熱帯の天水畑での雨水貯留機能の低下は深刻で、干ばつなど農業生産を制限する原因の一つとなる。この問題は、灌漑農業では灌水効率の低下となって現れる。

干害と湿害の助長: 土壌クラストの形成は、干害と湿害の両方を助長する。有原ら (1991) は、インド半乾燥地の Alfisols でクラスト形成による通気性の低下が湿害の誘因になることを示唆した。

作業負荷の増大: 土壌クラストを形成し易い耕地では、しばしば播種のやり直しを余儀なくされたり (横井ら, 1989)、雨水貯留能の向上や土壌侵食の抑制を意図した表土管理が行なわれる (田中, 1991)。

2) 土壌保全への影響

耕起・整地作業から作物が十分に生育するまでの作季

前半は、耕地面の被覆が乏しいため、土壌侵食や土壌クラスト形成が起こりやすい時期である。

多くの研究者が、クラスト形成による透水性の低下に伴い表面流去量が増大することが、土壌侵食の誘因になると指摘している。一方、表面流去量は増えるものの、クラスト形成の過程で土壌表面の粒子の耐剝離性も増すため、結果として土壌流亡が抑えられる場合も考えられる(西村ら, 1991)。いずれにしても、土壌侵食の営力(降雨と流去水の作用)が働く「場」は、僅か数mm程の深さまでであるため、土壌侵食の発生機作の解明や受食性の評価に際しては、降雨特性や地形要因などに加えて、降雨下での土壌表面の刻一刻の物理性的変化(例えば、比較的短時間に起こる粒団の崩壊、孔隙の閉塞および薄層の形成による透水性の低下など)やその難易を考慮する必要がある。

### 3. 土壌クラストの性状評価

土壌クラストは、僅か数mm程度の厚さを持つ薄層構造であるため、従来法ではその性状の直接測定には困難があった。定量的な物理性評価法の確立は、クラスト形成の程度の判定やそれに影響を及ぼす諸条件(降雨特性、土壌の性質など)との関係付け、農業および土壌保全への影響を評価する前提である。土壌クラストの性状評価は、主として形態観察(Duley, 1939; McIntyre, 1958; Casenava et Valentin, 1989)、画像解析による形態的特徴の定量評価(Onofiook and Singer, 1984; Tanaka and Kyuma, 1992; Tanaka et al. 1992)、貫入硬度計による評価(Drew, 1971)および透水性の測定を通じて行われてきた。

筆者は、図-1に示す手順で土壌クラストの形成程度の評価を行なった。土壌クラスト試料は、日本各地の畑土壌から篩別した粒径1.0~2.0mmの自然団粒あるいは人為的に造粒した人工粒団を、図-2のようにプラスチック製の試料円筒(内径50mm、高さ50mm)に充填し、砂柱法、加圧板法、蒸気圧法などにより任意の水分状態に調節して、次いで2分間ないし5分間の人工降雨(降雨強度4.48mm/min、水滴径2.7mm、落下高1.5m)および自然降雨を作用させて得た。形態観察では、実体顕微鏡による降雨処理前後の土壌表面の状態(粒団の崩壊程度、細粒質の沈積など)や偏光顕微鏡による土壌表面断面(薄片試料)の形態(粒子配列、孔隙の状態、緻密層の位置と厚さなど)および肉眼による降雨処理中の土壌粒子の挙動や飛沫、滞水の発生の様子を記録した。透水性パラメータによる定量評価の手順は、人工降雨あるいは自然降雨処理した試料をプラスチック円筒ごと透水性測定装置にかけ、透水性( $K = \text{cm/sec}$ )を測定し、その負

対数( $-\log K$ 値)を土壌クラストの形成程度を示す指標値として採用するというものである(田中, 未発表)。これは、この値が大きいほど透水性が低く、すなわち土壌クラストの形成程度が大きいことを表す。この手順は、一度に多点数の試料を対象として土壌クラストの形成程度をの判定できる簡便な方法である。

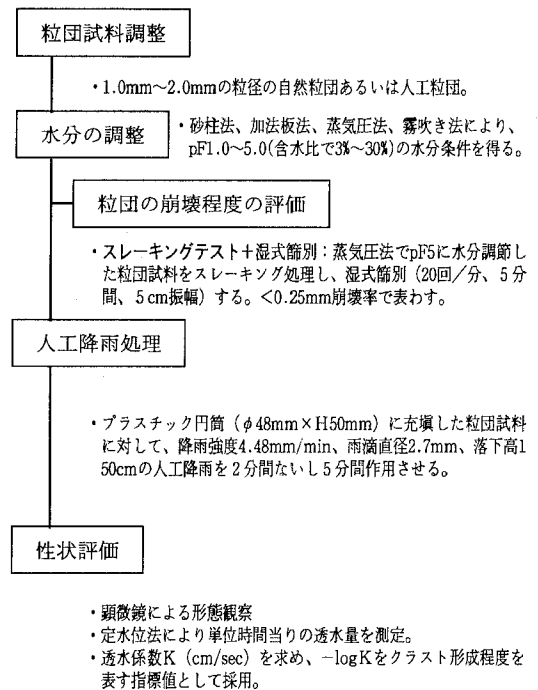


図-1 本研究で用いた土壌クラストの性状評価の手順  
Fig. 1 Procedures of the evaluation on the properties of soil surface crusts

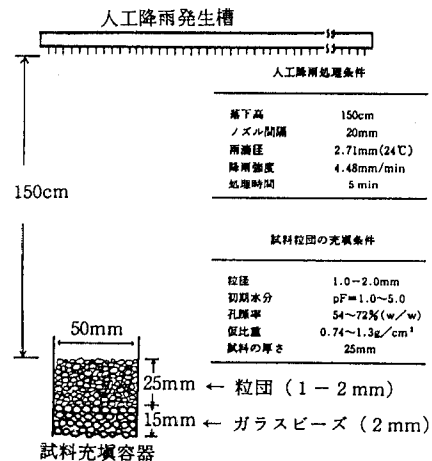


図-2 人工降雨条件および供試試料  
Fig. 2 Condition of simulated rainfall treatment and packed aggregates

#### 4. 土壌クラストの形成過程および形態の類型

土壌クラストの形成過程の基本型は、以下のように説明できる(田中,1994)。まず、雨滴の作用(降雨直後にはスレーキング、その後はインパクト)により土壌表面の粒団の崩壊・細粒化が起こる。粒団が雨滴に対して不安定な土壌では、短時間のうちに極表面に堅密な薄層を形成する。やや安定な粗粒質の土壌では、インパクトや雨水の浸透により微小粒団や細粒質が孔隙に入り、表面よりやや下に比較的密な薄層を形成する。これらを「Structural crust」と呼ぶ。雨滴のインパクトにより土壌表面は練り返しを受け、土壌粒子は更に密に充填される。土壌表面の平坦部や凹部では、透水能の低下に伴う滞水が起こり、インパクトは減衰するものの、攪拌作用により細粒子が懸濁する。土壌表面の凸部や傾斜部からは、細粒子が表面流去水で凹部に運ばれ、再堆積して「Depositional crust」を形成する。降雨履歴を反映して、クラスト層が幾つかの薄層を持つこともある。細粒化する粒子の多い土壌では降雨後、平坦部や凹部に極めて薄い沈積層(Seal skin)が形成される。実際に野外で観察されるクラストの形態は、降雨履歴、水食や風食、耕作履歴などを反映して多様である。

本研究では、人工降雨処理により人為的に土壌クラストを得たが、その形成過程は上記と同様と推定され、また形態は、次のように区分された。①タイプA：幾分崩壊しているが形状をとどめた粒団が顕著で、堅密層の形成が弱いかほとんど認められない；②タイプB：表面から数mm下方に小粒団からなる比較的密な層(Washed-in layer)を有する；③タイプC：粒団の崩壊による密な層とその表面に細粒質の沈積による被膜(Seal skin)を有する；④タイプD：タイプCと類似の形態を有するが、表面は粗砂が顕著でSeal skinは認められない。

#### 5. 土壌クラスト形成に影響を及ぼす諸条件

土壌クラストの形成程度に影響を及ぼす諸条件は、環境要因(例えば、降雨特性、微・小地形、土面被覆の程度)と土壌要因に分けられる。また、これら以外の要因として、耕作履歴や灌漑水の水质などが挙げられる。一般論として、クラスト形成に影響を及ぼす土壌要因として、降雨前の土壌表面の初期状態(水分、粒団径あるいは孔隙径の分布)や土壌の理化学的諸性質(土性、土壌粒子の分散性、カチオンの組成、有機物、Fe・Alなどの非晶質成分、卓越する粘土鉱物の種類、粒団の安定性など)が示唆されている。しかしながら、クラストの性状評価法が未確立で、多試料についての検討が立ち後れているため、定量的関係の把握はまだなされていない。ここでは、土壌要因についてこれまでに筆者が得た知見

表-1 透水性パラメータ(-logK値)により評価されるクラスト形成程度と相関が見られた土壌の性質  
Table 1 Relationship between crusting susceptibility and some soil properties affecting it

項目	評価指標(-logK値)との相関
< 0.25mm粒団の割合	0.725**
非晶質アルミニウム (Alo)	-0.570**
非晶質鉄 (Feo)	-0.458**

\*\*：1%有意水準、n=58

を紹介する。

##### 1) 土壌クラスト形成に影響を及ぼす土壌の諸性質

透水性パラメータ(-logK値)をクラスト形成程度の指標として、日本各地の畑土壌58点について、その物理的、理化学的および化学的諸性質との対応を調べた結果、土壌クラストの形成の難易と粒団の安定性(<0.25mm崩壊率、 $r=0.752^{**}$ )、酸性シュウ酸塩溶液可溶性の非晶質アルミニウム(Alo、 $r=-0.570^{**}$ )および非晶質鉄(Feo、 $r=-0.458^{**}$ )との間に有為な相関が認められた(表-1)。なお、<0.25mm崩壊率とは、pF5相当に水分調整した粒径1.0~2.0mmの粒団試料を水中に落とし、さらに緩やかに水中篩別した時に0.25mm以下に崩壊する粒団の割合であり、この値が大きければ粒団の安定性が低いことを意味する(田中,未発表)。相関が認められた性質のうち後二者は、粒団の安定性に影響を及ぼす性質と考えられるので、土壌クラストの形成は、雨滴の作用や濡れに対する粒団の安定性や粒子の挙動に左右されるといえる。これは、先述の人工降雨下での土壌クラスト形成過程の観察とも一致する。なお、有機物や分散性など今回対応が見られなかった諸性質の影響については、後述する降雨処理前の土壌の初期条件により打ち消されている可能性も否定できず、今後の検証が必要である。

##### 2) 土壌の初期水分条件と土壌クラストの形成

土壌表面の初期条件(水分、土塊の粒径、被覆の有無など)のクラスト形成への影響を把握することは、その形成機作の解明や圃場での対策に有用な情報を与える。そこで、本研究では、風乾細土に水を加え練り返しにより人為的に造粒した粒団試料を用いて、土壌の初期水分条件、それに対応する粒団の安定性およびクラスト形成程度との関係付けを試みた。図-3は、その一例を示すもので、次のように解釈できる。①粒団の安定性(スレーキングによる崩壊程度)とクラスト形成程度は、いずれも初期水分条件の違いに左右される、②クラスト形成の難易は、臨界スレーキング水分点(Critical slaking

moisture content) を境とする水分領域と概ね対応し、乾燥領域と半湿/半乾燥領域でクラスト形成程度が大きく、湿潤領域で小さい、③初期水分条件と降雨処理時間の違いを反映したクラスト形成程度の変化から、「スレーキング型」と「インパクト型」の形成機作が考えられる。これらの初期水分領域で起こる土壌クラストの形成過程は、Bresson and Cadot (1992)の模式図により説明できる。例えば、湿潤な土壌面に雨滴が作用する場合、スレーキングによる崩壊は起こらず、インパクトにより粒団が徐々に削削しクラスト層が形成され(図-4、上)、一方、乾いた土壌面ではスレーキングによる急激な粒団の崩壊と孔隙の閉塞が短時間におこる(図-4、右下)。

6. 土壌クラスト研究の進捗状況と今後の展開

土壌表面は、土壌界と大気界の界面にあって、常に種々の営力にさらされ刻々と変化する。土壌クラスト形成のようなごく表層の物理性の悪化や土壌侵食などは、まさにこの界面で起こる現象であり、農耕地の利用や保全に及ぼす影響も大きい。本報告を終えるにあたって、土壌クラスト研究の進捗状況と今後取り組むべき課題を表-2に示して結びとしたい。

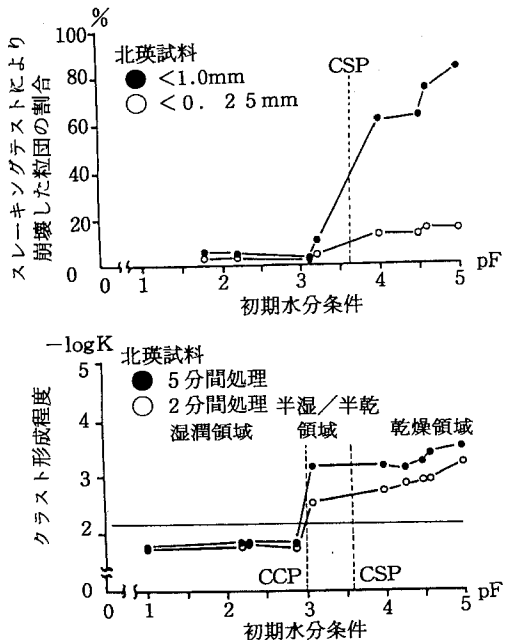


図-3 初期水分条件と粒団の崩壊程度および土壌クラストの形成程度  
Fig. 3 Effect of initial moisture condition over aggregate disintegration and degree of crusting

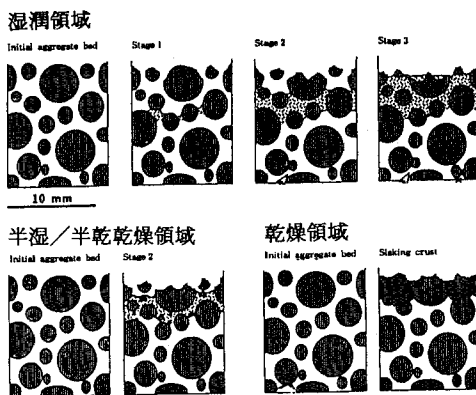


図-4 異なる水分領域のもとでの土壌クラストの形態と形成過程(Bresson and Cadot, 1992より引用)  
Fig. 4 Process of crust development under different moisture condition (cited from Bresson and Cadot, 1992)

表-2 土壌クラスト研究をめぐる諸課題と研究の進捗度  
Table 2 Future topics on the study of soil crusting

1. クラストの性状の測定(観察)方法の検討
  - 光学顕微鏡・電子顕微鏡観察(◎)、画像解析(○)
  - 透水性による評価(○)、硬度など(△)
2. クラストの形成機作の解明
  - 形態観察による形成機作の説明(◎)
  - 環境要因との関係(定量的把握): 降雨(△)、微・小地形(×)、被覆(×)
  - 土壌要因との関係(定量的把握): 粒段の性質(○)、初期水分条件(○)
3. クラスト形成傾向の評価(潜在的クラスト形成土壌の分級)
  - 評価の方法と指標の確立(○)
  - 土壌の諸性質との定量的関係付け(×)
  - 発生予測あるいは潜在的クラスト形成土壌の分級(×)
4. 土壌侵食との関係
  - 土壌侵食の諸パラメータとの定量的関係付け(×)
  - 受食性評価、土壌侵食予測式への組み込み(×)
5. 農業および土壌保全への影響評価と対策
  - 作物生育への影響: 幼作物の伸長の妨害(○)
  - 表層物理性悪化の実態: 通気性の不良化(△)、雨水貯留機能の低下(×)
  - 土壌侵食(前出)
  - 対策の検討: クラスト形成による畑作全般への影響の評価(×)、砂粘土・石膏などの効果(○)、農法的対応の事例収集(×)

註: ( ) 内の◎○△×は、進捗度を表わす  
謝 辞

本報告は、久馬一剛博士(元京都大学教授)、横井義雄氏(道央農試)および京都大学農学部土壌学研究室の学生諸氏との研究を通じて得られた成果を中間的に取りまとめ、1993年度日本土壌肥料学会沖縄大会シンポジウムで発表したものである。研究の実施に際しては、日本生命財団より研究助成をして頂いた。また、岩間秀炬博士(農環研)には、この研究が発展途上であるにもかかわらず、当シンポジウムでの発表の機会を与えて頂いた。記して謝意を表します。

## 引用文献

- 有原丈二・阿江教治・岡田謙介：インドの半乾燥熱帯地域の土壌の物理性と作物生産、土壌の物理性、第63号、13-18 (1991)
- Bresson, L.M. and Cadot, L. : Illuviation and structural crust formation on loamy temperate soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 56, 1565-1570 (1992)
- Casenava, A. et Valentin, C. : Les etats de surface de la Saherienne. *Actiques. Paris.* (1989)
- Drew, L.O., Gardner, T.H. and Dickson, D.G. : Seedling thrust versus soil strength. *Trans. ASAE*, 14, 315-318 (1971)
- Duley, F.L. : Surface factors affecting the rate of intake of water by soils. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.*, 4, 60-64 (1939)
- Lal, R. : Soil surface management in the tropics for intensive land use and high and sustained production. In *Advances in Soil Science*, Vol. 5, Ed. B.A. Stewart, 1-109, Springer-Verlag, New York (1986)
- McIntyre, D.S. : Permeability measurement of soil crusts formed by raindrop impact. *Soil Sci.*, 85, 185-189 (1958)
- 西村拓・中野政詩・宮崎毅：室内人工降雨装置による土壌流出量の予測、*農土誌*、59(3)、283-288 (1991)
- Onofiok, O. and Singer, M.J. : Scanning electron microscope studies of surface crusts formed by simulated rainfall. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 48, 1137-1143 (1984)
- Randhawa, M.S. : A history of agriculture in India. vol 3, Indian Council of agricultural Research (ICAR), New Delhi (1980)
- Tanaka, U. and Kyuma, K. : Quantification of morphological characteristics of crust by thin section-image analyzing method (TS-IA method). *Soil Sci. Plant Nutr.*, 38(2), 369-373 (1992)
- Tanaka, U., Yokoi, Y. and Kyuma, K. : Morphological characteristics of soil surface crusts formed under simulated rainfall. *Soil Sci. Plant Nutr.*, 38(4), 655-664 (1992)
- 田中樹：インド亜大陸の伝統農法に半乾燥地農業成立の要件と展開の可能性を探る、トヨタ財団助成研究報告書 (1991)
- 田中樹：土壌クラストとその形成条件、農業技術大系、第3巻、農文協 (1994)
- 横井義雄・長谷川進・坂本宣崇：堅密固結性土壌に対する砂質火砕流堆積物の客土効果、*北農*、56巻 (1989)
- (受稿年月日 1994年6月3日)