

人工降雨下で形成された水田転換畑作土の クラストの性質と土壌の諸特性の関係

小原 洋*・高橋智紀**・細川 寿***

Properties of Surface Crusts of Converted Paddy Soils Formed under Simulated Rainfall

Hiroshi OBARA*, Tomoki TAKAHASHI** and Hisashi HOSOKAWA***

* National Agricultural Research Center, Hokuriku Research center,
 (NARC Hokuriku) 1-2-1 Inada, Joetu, Niigata 943-0193, Japan
 (present : National Institute for Agro-Environmental Sciences,
 3-1-3 Kannondai, Tsukuba, Ibaraki 305-8604, Japan)

** NARC Hokuriku (present ; Shizuoka Prefectural Research Institute of Agriculture
 and Forestry, 678-1 Tomioka, Iwata, Shizuoka 438-0803, Japan)

*** NARC Hokuriku

Abstract

Soil crusting is one of the major problems affecting the emergence of soybean seedlings in converted paddy fields in some regions of Japan. To identify the converted paddy fields in which soybean emergence is at risk from soil crusting, we collected twenty-seven samples of surface soils from paddy fields across Japan. Relationship among physical and chemical properties, clay mineralogy and surface crusting under simulated rainfall were studied.

In terms of morphology, most of the soil samples showed crust after exposure to a rainfall of 37 mm/h. With regard to the relationship between crust properties and soil characteristics, some correlations were found between the decrease in infiltration and the hardness and area of the cracks when crust dries. The infiltration rates were correlated with the mean weight diameter of aggregates. The hardness indicated a rather obscure correlation between the silt contents and acid-oxalate-extractable aluminum (an indicator of Andic properties). The cracked areas were clearly correlated with the sand contents. With regard to clay mineralogy, in the soil samples which showed no or trace peak for kaolinite and vermiculite and a clear peak for smectite, hardness did not increase after drying.

Key words : soil crusts, converted paddy fields, soybean seedling emergence, physicochemical properties, clay mineralogy

1. はじめに

大豆は近年水田の転換作物として広く全国的に栽培されているが、転換畑での大豆作では出芽の良・不良が安

定した収量を得るために重要なポイントになっている。出芽不良の原因には、湿害、鳥虫害、乾燥等々なものがあるが、その中で東海から西南日本や北海道等でクラストによる発芽不良が問題となっている(岩淵ら, 2006 ;

* 農業・食品産業技術研究機構中央農業総合研究センター北陸研究センター 〒943-0193 新潟県上越市稲田 1-2-1
 (現在 農業環境技術研究所 〒305-8604 茨城県つくば市観音台 3-1-3)

** 同上 (現在 静岡県農林技術研究所 〒438-0803 静岡県磐田市富岡 678-1)

*** 同上

キーワード : クラスト, 転換畑, 大豆出芽, 土壌理化学性, 粘土鉱物

横井, 1998, 2006)。

クラスト(土膜)は、雨滴による物理的な破壊やスレーキング等により土壌表面の団粒が壊れ、分散した粒子が孔隙の目詰まりを起こす現象である(Tanaka *et al.*, 1992)。一般には乾燥して固くなった土膜をクラストと呼ぶが、ここでは硬さを問わず降雨によってできる土膜をクラストと呼ぶ。一般的に、クラストの生成は透水性の悪化を引き起こし、土壌侵食を助長し、通気性を低下させ、クラストが乾燥すると緊密な薄層が生じ出芽を妨げるとされている(ヒレル, 1998)。しかし、クラストと大豆の出芽の関係についての研究報告はまだ多くなく(Rathore *et al.*, 1981; 岩淵ら, 2006; 横井ら, 1998; 佐川ら, 1991等)、また水田転換畑という条件でクラストのできやすさを土壌の性質から検討した例はない。

クラストの生成と耕耘作業との関係で、1) 碎土率を低くし、播種床表面の粗度を上げると、クラストの生成を遅らせることができる。2) 湿った土を耕耘すると土壌構造が壊れ、土壌が分散しやすくなる、などが知られている(Bresson, 1995)。このため、クラストが生成、発芽抑制しやすい土壌に対しては、耕耘方法に大きな制限が生じる。また、本来大豆の吸水に有利であるはずの「湿った土壌を細かくする」という作業(高橋ら, 2008)が、地表の状態(水分状態、団粒径)をクラストのできやすい条件に変え、クラストの危険性を高める可能性がある。これらの点から、クラストができやすく、またクラストが大豆の発芽を抑制するほど固くなりやすい土壌のタイプを明らかにすることは、転換畑についてクラストを考慮しなければならぬ地域を判定し、適切な耕起法を選択するなど対策を考える上で重要と考えられる。

本研究では、全国から収集した27地点の水田作土を対象に、人工降雨によるクラスト発生試験によって生成したクラストの性質、およびクラストの性質と土壌の理化学性・粘土鉱物種との関係を解析し、クラストによる発芽抑制の起こりやすい土壌の条件を検討した。

2. 方 法

2.1 サンプル

日本全国から、水田の作土27試料を各地の試験研究機関に依頼して収集した(表-1)。全地点水田だが、前作は大豆3地点、小麦2地点、テンサイ1地点で、そのほかは水稲であった。土壌としては、黒ボク土2地点、黄色土3地点を除き、沖積土壌である。

2.2 実験方法

土壌の一般理化学性分析は、土壌環境分析法(1997)によった。なお、耐水性団粒はスレーキングを起こさないようにエタノール中で篩別する方法(Le Bissonnais,

1996)をもちい、平均重量直径を算出した。交換酸度と塩基交換容量(CEC)は亀和田の方法(亀和田, 2001)によった。また、pF 1.8の含水比は2mmのふるいを通した土壌を軽くたたいて採土管に詰めて加圧盤法によって測定した。粘土鉱物は、脱鉄処理後に粘土画分を採取し、カリウムおよびマグネシウム処理、グリセロール処理および熱処理(550°C)し、X線回折装置(Rigaku RAD II A, ターゲットCu 対陰極元素K α)で分析した。粘土鉱物の割合はピーク強度を4段階(区分の記号と与えた値, “ピークなし(-)”:0, “弱いピークあり(+)”:1, “ピーク明瞭(++)”:2, “ピーク強く明瞭(+++)”:3)に判定した。また、各ピーク強度に与えた値を元に定性的相対比率を算出した。

降雨実験は、人工降雨装置をMorin *et al.*の方法(Morin *et al.*, 1967)で作成し、行った(写真-1)。本装置の降雨特性は、時間雨量19 mm h⁻¹(降雨条件①)および37 mm h⁻¹(降雨条件②)の2段階、平均雨滴直径1.8 mm、雨滴速度5.8 m/secであった。なお、平均雨滴直径は濾紙法、雨滴速度は高速連続写真により実測した。また、雨量のばらつきは最大10%程度であった。クラスト試験用サンプルは、容器(約縦15 cm 幅10 cm、高さ5 cm、ポリプロピレン製)の下部に穴をあけ、ガーゼで土砂が落下しないようにし、砂(約5 mm)を敷いた後、4 mm以下に選別した風乾土壌(約300 g)を厚さ2 cmになるように敷いた(以後サンプル箱と呼ぶ)。サンプル箱を人工降雨装置下に浸透した排水を計るため約5°の角度を付けてセットし、積算降雨40 mm程度にさらした。降雨には水道水を用いた。降雨中にサンプル箱底部から浸出する水を電子天秤に受け、15秒間隔で計測し、降雨量が積算して30 mmに達する時の浸透流出水量(mm h⁻¹)を測定した。このときの流出水量を降雨強度(19 mm h⁻¹, 37 mm h⁻¹)で割った値を30 mm時の透水性低下率とした(図-1)。降雨実験終了後、サンプル箱を40°Cの送風乾燥機に2日間入れ乾燥させた。乾燥後のサンプル箱について、亀裂の面積割合、クラスト硬度計(山中式硬度計類似のコーン式硬度計、バネを3段階交換できる。DIK-5561, 大起理化学工業(株))による強度を測定した。クラストの硬さの測定については、引っ張り上げ式(Bennett *et al.*, 1964)、突き上げ式(Holder *et al.*, 1974)、貫入式(Rolston *et al.*, 1991)、複合式(Upadhyaya *et al.*, 1995)等多くの方法があるが、日本国内の大豆出芽関係試験でよく使われているクラスト硬度計を用いた。クラスト硬度計は1 kgと4 kgバネを使用し、サンプルの土層厚が20 mm程度のため20 mm以上入らないように調整し、1サンプルあたり3~4回亀裂がない所で測定し、その平均値をデータとした。さらにクラストを壊し

表-1 サンプル採取地の概要

Table 1 General information of sampling sites.

no	サンプル名	土壌名	前作	現地観察でのクラスト頻度*
#1	秋田八郎潟	細粒質斑鉄型グライ低地土	水稲	0
#2	岩手盛岡	腐植質厚層多湿黒ボク土	水稲	0
#3	山形鶴岡	細粒質斑鉄型グライ低地土	水稲	0
#4	新潟長岡	細粒質斑鉄型グライ低地土	大豆	0
#5	新潟上越	細粒質斑鉄型グライ低地土	水稲	0
#6	富山	礫質普通灰色低地土	大豆	1
#10	石川金沢	細粒質表層灰色グライ低地土	水稲	1
#11	福井	細粒質斑鉄型グライ低地土	水稲	0
#12	岐阜揖斐川	灰色低地土	大豆	2
#14	三重安濃 U2	黄色土	—	—
#15	三重安濃 V1	多腐植質厚層非アロフェン質黒ボク土	—	—
#16	福岡筑後	細粒質普通灰色低地土	水稲	1
#17	茨城つくば	細粒質普通灰色低地土	水稲	2
#18	滋賀	粗粒質表層灰色グライ低地土	水稲	2
#19	新潟新発田	灰色低地土	水稲	0
#20	広島	細粒質灰色化グライ低地土	水稲	0
#21	福島	細粒質普通灰色低地土	水稲	0
#22	愛知	細粒質台地 (or 水田化) 黄色土	水稲	2
#23	岡山	中粒質普通灰色低地土	水稲	—
#24	香川四国	黄色土	水稲	0
#25	佐賀	細粒質普通灰色低地土	小麦	2
#26	鳥取	細粒質普通灰色低地土	水稲	1
#27	北海道上川 1	砂壤土, 褐色低地土 (客土)	小麦	1
#28	北海道上川 2	灰色低地土	水稲	2
#29	北海道夕張	灰色低地土	テンサイ	1
#30	新潟湖南	灰色低地土	水稲	1
#31	石川松任	灰色低地土	水稲	1

注:「—」は不明。

*現地での発生頻度。0:ほとんどなし, 1:時々, 2:頻繁。

てその破断面を肉眼観察し, 表面から緻密に土粒子がつまり相互に連結し一体化している部分の厚さを, 薄い部分と厚い部分の2箇所でノギスを用いて測定し, クラストの厚さとした。

また, 統計解析には STATISTICA ver 6.1 (STAT Soft inc.) を使用した。

なお, 降雨実験では 4 mm 以下の画分の風乾土を用いた。土壌の水分・土塊の大きさ, 圧縮あるなし等によりクラストのでき方が異なり (Nishimura *et al.*, 1999; Asgedom *et al.*, 2005; Lado *et al.*, 2004), 現地の転換畑の状況 (幅の広い水分, 砕土状態) を再現しているとは言えないが, 全国各地の土壌を同一条件で比較するために上記条件で行った。

3. 結果と考察

3.1 試料の理化学性

表-2 に一般理化学性を示した。pH は愛知が 4.8 と最も低く, 岡山が 7.4 と最も高いが, 他の多くの点は 5.5~6.5 の間にあった。全炭素は黒ボク土系の岩手盛岡 (83.0 g kg^{-1}) と三重安濃 V1 (72.7 g kg^{-1}) が高いが, 他の多くは 10 から 30 g kg^{-1} の間にあった。交換性塩基類では, 4 塩基合計で見ると, 秋田八郎潟が最大 (37.8 $\text{cmol}_c \text{kg}^{-1}$), 新潟湖南が最小 (3.7 $\text{cmol}_c \text{kg}^{-1}$) であった。CEC は, 富山で最も低く 5.3 $\text{cmol}_c \text{kg}^{-1}$, 秋田八郎潟が最高で 40.6 $\text{cmol}_c \text{kg}^{-1}$ であった。リン酸吸収係数は, 岩手盛岡で最大 (1899), 新潟湖南で最小 (278) であった。遊離

酸化鉄 (Fed) は新潟湖南の 1.5 g kg^{-1} から福島の高山 16.9 g kg^{-1} の間にあった。酸性シュウ酸塩可溶の鉄 (Feo) とアルミニウム (Al_o) は、岩手盛岡と三重安濃 VI の黒ボク土類で高く、ケイ酸はアロフェン質の岩手盛岡で高かった。土性は HC 1点, LiC 10点, SiC 2点, CL 8点, SiCL 1点, L 1点, SL 4点であり、粘土含量は高山が最も低く 5.8%, 秋田八郎潟が最も高く 50.3% であった。

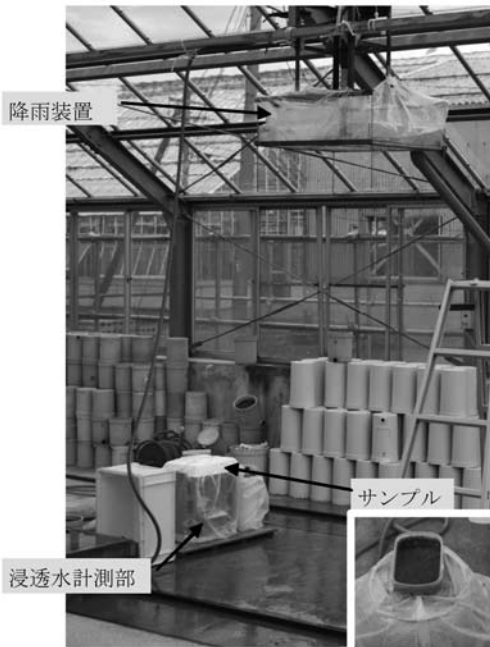


写真-1 人工降雨実験

Photo 1 Rainfall simulator.

耐水性団粒の平均重量直径は、秋田八郎潟の 2.52 mm から、三重安濃 VI の 0.42 mm の範囲にあった。pF 1.8 の含水比は、岩手盛岡の 0.68 kg kg^{-1} から、新潟湖南の 0.22 kg kg^{-1} の間にあった。塑性限界の含水比は、砂質で測定できなかった2点を除き、岩手盛岡で最大 (0.65 kg kg^{-1})、広島で最小 (0.25 kg kg^{-1}) であった。畑地化の指標として用いられる塑性限界水分/pF 1.8 水分比では、鳥取が最大 (1.49)、石川松任が最小 (0.90) であった。

3.2 クラスト発生試験

クラストの性質の指標として 30 mm 降水時の透水性低下率、乾燥後のクラスト硬度計の読み、クラスト部分の厚さ (薄い部分と厚い部分の mm)、亀裂面積を測定・観察した (表-3)。ただし、硬度とクラストの厚さは、降雨条件② (降雨強度 37 mm/h) における値である。なお、降雨実験中に透水性の低下が起こったサンプルでは、傾斜下部に表面水が発生した。サンプル容器の枠を超えた表面水は系外へ流出させた。そのため、降雨初期には構造的なクラストが生成し、湛水後は堆積性のクラストも生成したと思われるが、本試験では両種を区別しなかった。

クラストの厚さのデータにあるように、全てのサンプルである程度のクラスト (緻密な膜状の表面が認められ、硬くならず、透水性も悪くならないものも含む) ができた。ただし、新潟県の新発田、長岡の2土壌では、クラストは部分的に生成され全面に覆うクラストはできなかった。

30 mm 降雨時の透水性の低下割合は、降った雨のまま出ていくもの (低下率 1) から、降った雨の2割程度しか下から出てこないもの (低下率 0.19) までであった。降雨条件①と降雨条件②で逆転するサンプルも3点ほ

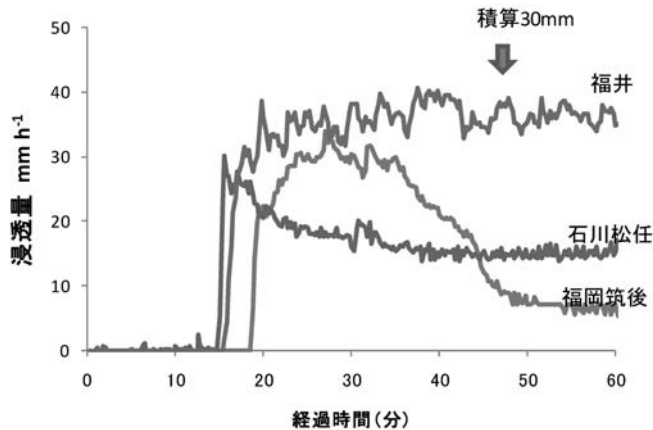


図-1 サンプル箱から浸出する水量の時間的变化 (降雨強度②の例)

Fig. 1 The infiltration rate of three soils.

どあるが、降雨強度の高い条件②の方で低下率が大きい(数値が小さい)場合が多い。降雨強度が大きくなったため目づまりの進行が強くなった場合と、同じ透水速度でも降雨強度が大きいため分母が大きくなり相対的に低下率が低くなった場合があるためと思われる。

クラスト硬度計は、1 kg バネ(ほぼ 0-20 mm (土壌硬度として 0-390 kPa) の範囲)と 4 kg バネ(ほぼ 0-20 mm (0-1,560 kPa) の範囲)で試験したが、1 kg バネで 10 mm (86.7 kPa) に届かないサンプル(盛岡, 長岡, 新発田)は、乾燥後もほとんど硬くならない事を示している。1 kg バネで 10 mm 以上を示す土壌(24 点)は、ある程度硬くなっているが、北海道立農試の試験で大豆の出芽不良が始まる硬さとされている 4 kg バネで 10 mm (347 kPa) という値と比較して、9 点以外は大豆の出芽を阻害するほど十分に硬くなっているとは言えない。

クラストの厚さでは、上越と佐賀が薄いところで 2 mm 以下、厚いところでも 3 mm 以下と薄いのが、そのほかは薄いところでも 3 mm 以上、厚いところは 5 mm 以上であった(写真-2)。その中で、薄いところで 7 mm 以上、厚いところで 10 mm を越える土壌もあるが、このように土壌が厚く緻密化する現象をクラストと呼ぶべきかどうかは疑問がある。このような土壌のなかには、雨滴が直接作用しないところで浸透水によりスレーキングを起こすなどして、作土が緻密になり出芽を阻害する障害(‘Hard-setting’, 以後ハードセッティングと記す)を起こしているものがあると推察される。

クラストの性質相互間の関係を検討するため、透水性低下率、堅さ、厚さ、亀裂面積の 4 性質間の相関を表-4 に示した。透水性低下率は硬度とは有意な弱い負の相関を示し、「透水性が低下する土ほど硬くなる」という緩やかな関係が推察される(図-2)。また硬度は亀裂率と弱い正の相関を示し、「硬くなる土ほど収縮も大きく亀裂の面積も大きいものが多い」という緩やかな関係が推察される。また、厚さは、硬度 4 kg バネと 5% 有意で相関を示し「クラストが厚いと硬いクラストが多い」という緩やかな関係が推察される。これらのことから、4 種のクラストの指標は緩やかな相互関係はあるが、明瞭な対応関係はないと判断される。従って、クラストの起こす様々な問題を、どれか 1 つの指標だけで検討するのは難しいと判断した。

3.3 土壌の理化学性とクラスト試験結果の関係

クラストの測定項目と土壌の理化学性間の相関係数を表-5 に示した。30 mm 降雨時の透水性低下率は、耐水性団粒の平均重量直径との相関が最も高く、畑地化指数(降雨条件②のみ)、と弱い負の相関、そのほかごく弱く不鮮明だが、シルト含量、交換性 Ca、交換性塩基合計、

塩基交換容量、酸性シュウ酸塩可溶 Mn 等と 0.3 以上の相関係数を示した。平均重量直径と透水性低下率の散布図(図-3)を見ると、平均重量直径が 1.0 mm を越えたサンプルでは、降雨強度 2 段階のどちらでも大きな透水性の低下は発生しなかった。また、耐水性団粒の平均重量直径と粘土含量の関係(図-4)では、粘土含量が 25% 付近の土壌が最も細粒化しやすかった。このことは、Ben-Hur *et al.* (1985a) が、粘土含量 20% 程度の土壌が最もクラスト形成に感受性が高いと言っていることとほぼ一致する。

シルト含量は透水性低下率と、弱いながら負の相関を示す。また、耐水性団粒の平均重量直径との相関はさらに曖昧だが、シルト含量 40% 以上の範囲では耐水性団粒の平均重量直径が小さい(図省略)。シルトの含量が多いと団粒安定性が低く、クラストができやすいということについては様々なところで言及されている(FAO, 1998, Cattle *S. et al.*, 2004 等)ことからみて、この結果は妥当と考えられる。

これらのことから、透水性低下率から見たクラスト発生しやすさは団粒の安定性に関係があると言われている(Tanaka *et al.*, 1995; Le Bissonnais, 1996) ことが水田作土についても当てはまる。また粘土、シルト含量と耐水性団粒の平均重量直径の関係から、土性のデータからもある程度団粒の安定性を推定できる可能性があると考えられる。

風乾後のクラストの硬度では、1 kg バネ使用時の硬度が比較的多くの項目と相関を示した。負の相関では、塑性限界水分量が最も高く、ついで酸性シュウ酸塩可溶 Al, Si, Al+1/2Fe, リン酸吸収係数, pF 1.8 含水率, 全炭素等が 5% 水準で有意の相関を示した。正の相関では 5% 水準で相関を示す項目はなかったが、シルト含量が $r=0.3$ を越える相関を示した。一方 4 kg バネ使用時の試験結果では、塑性限界水分量、耐水性団粒の平均重量直径で負の相関が 5% 水準で有意、正の相関ではシルト含量が 1% 水準で有意であった。また、酸性シュウ酸塩可溶 Al (Al₀) は全サンプルでは $r=-0.251$ と低い相関だったが、黒ボク土を除いた場合は $r=-0.502$ で、5% 水準で有意の相関を示した。1 kg バネ硬度で測定される比較的軟らかいレンジでは、土壌の物性を示す塑性限界水分量(図-5)、耐水性団粒の平均重量直径やシルト含量などの項目の他、「容積重が小さく、軽しょう」という黒ボク土的な性質に関係があると考えられる酸性シュウ酸塩可溶の Al やリン酸吸収係数、また有機物による柔らかさと関係する全炭素含量など多くの項目が現れている。一方、4 kg バネ硬度で測定されるより高い硬度のレンジでは、シルト含量及び黒ボク土を除いた場合の酸性

表-2 供試土壌の

Table 2 Physicochemical

no	サンプル名	pH	全炭素	交換性塩基					酸度	CEC	リン酸 吸収 係数
				Ca	Mg	K	Na	合計			
				g kg ⁻¹		cmolc kg ⁻¹					
#1	秋田八郎瀧	6.32	27.7	33.0	5.3	1.25	0.99	40.6	0.0	40.6	1361
#2	岩手盛岡	6.39	83.0	14.1	1.5	0.27	0.16	16.0	13.4	29.4	1899
#3	山形鶴岡	6.38	20.9	12.2	3.2	0.16	0.23	15.8	1.7	17.5	772
#4	新潟長岡	6.02	26.3	10.8	6.8	0.39	0.48	18.4	5.3	23.7	991
#5	新潟上越	5.70	23.4	12.1	3.9	0.29	0.32	16.6	5.4	22.1	910
#6	富山	5.94	17.7	3.9	1.0	0.35	0.12	5.3	0.0	5.3	522
#10	石川金沢	5.82	16.8	8.1	5.9	1.36	0.41	15.8	4.6	20.4	816
#11	福井	6.08	24.9	15.3	4.4	0.41	0.27	20.4	0.8	21.2	977
#12	岐阜揖斐川	6.02	18.3	2.6	0.7	0.37	0.10	3.8	6.1	9.9	344
#14	三重安濃 U2	6.32	20.1	8.6	2.7	1.00	0.14	12.5	8.3	20.8	966
#15	三重安濃 V1	6.21	72.7	13.2	1.6	0.75	0.00	15.5	17.2	32.7	1416
#16	福岡筑後	6.18	22.1	16.3	4.5	0.70	0.94	22.4	5.0	27.4	886
#17	茨城つくば	6.02	19.1	12.4	2.2	0.39	0.18	15.2	6.3	21.4	828
#18	滋賀	6.14	18.1	8.2	1.6	0.37	0.00	10.2	2.9	13.0	484
#19	新潟新発田	5.66	35.0	6.1	0.6	0.18	0.08	7.0	7.5	14.5	633
#20	広島	6.36	11.5	7.2	2.1	0.44	0.36	10.1	2.0	12.1	511
#21	福島	5.99	20.6	10.6	2.5	0.27	0.75	14.1	4.1	18.2	728
#22	愛知	4.89	17.6	3.7	0.7	0.80	0.21	5.4	7.8	13.2	583
#23	岡山	7.40	17.3	10.0	1.1	0.56	0.00	11.7	0.0	11.7	417
#24	香川四国	6.18	14.7	8.8	2.2	0.63	0.00	11.7	4.1	15.7	394
#25	佐賀	5.65	18.8	12.8	5.6	1.21	0.08	19.7	6.2	25.9	851
#26	鳥取	5.52	25.6	5.9	0.8	0.24	0.10	7.0	5.7	12.7	560
#27	北海道上川 1	6.02	16.6	7.3	1.7	0.92	0.00	9.9	6.2	16.1	606
#28	北海道上川 2	5.38	30.1	4.6	1.5	0.43	0.06	6.6	10.6	17.2	717
#29	北海道夕張	6.57	22.6	10.0	6.0	1.00	0.11	17.1	3.7	20.8	639
#30	新潟湖南	6.00	10.3	2.7	0.6	0.36	0.07	3.7	4.0	7.7	278
#31	石川松任	6.01	14.9	4.1	1.1	0.34	0.15	5.6	2.8	8.5	303

注 *1: Fed はジチオナイトークエン酸塩還元溶解法の鉄, Alo, Feo, Sio は酸性シュウ酸塩溶解法の鉄, アルミ
*2: PL/pF 1.8 は塑性限界の含水比を pF 1.8 の含水比でわった値 (畑地化指標; 1 に近いほど畑地化が進ん

シュウ酸塩可溶 Al が相関を示し、他の項目は相関を曖昧にしている。なお、クラスト形成と酸性シュウ酸塩可溶 Al の関係については、田中 (1995) も有意な相関が認められるとしている。

粒径組成の中でシルト含量が硬度と関係を示す点については、明確な理由は解らないが、シルトがある程度の量あると、そのシルトが雨滴で分散した後比較的速やかに沈降し、砂等の粗骨格の間を埋めることによって、緻密な層を作るのに役立っているなどの理由が想像される。クラストの硬さとシルト含量の関係に関しては、Lemoz

et al. (1957) が人工的に作ったクラストの実験で、シルト含量が高いサンプルで高い破断係数が得られることを示している。また、シルトが 25% 以上かつ砂 35% 以上の場合、団粒がもっとも不安定 (FAO, 1998) で、シルト質の土壌はクラストができやすく侵食を受けやすい (Cattle, 2004) と考えられている。

砂含量は、相関係数としては硬度との関係は明瞭ではないが、砂含量 55% 以上のサンプルについてみると 4 kg バネ硬度で 10 mm 以上を示すサンプルは 10 点中 2 点と少ない。北海道 (横井, 2006) では、粘土 + シルト 35%

理化学性

properties of soils.

遊離酸化物*1				粒径組成				土性	含水比			
Fed	Alo	Feo	Sio	粗砂	細砂	シルト	粘土	団粒の 平均重量 直径	pF1.8	塑性 限界 (PL)	PL/ pF1.8*2	
g kg ⁻¹				%					mm	kg kg ⁻¹		
8.9	1.1	9.4	1.3	3.6	15.0	31.2	50.3	HC	2.52	0.48	0.40	1.19
14.9	43.9	19.3	19.6	19.9	28.3	27.4	24.3	CL	0.91	0.69	0.65	1.06
6.1	2.0	5.8	0.8	7.5	51.7	25.0	15.8	CL	1.73	0.43	0.38	1.11
12.2	2.0	13.0	0.6	9.8	31.9	31.8	26.5	LiC	0.91	0.50	0.37	1.34
16.9	1.2	15.7	0.4	4.6	22.5	37.6	35.3	LiC	1.93	0.46	0.33	1.38
2.7	3.5	2.9	1.3	24.8	46.3	23.0	5.8	SL	1.96	0.39		
10.5	0.7	10.7	0.5	5.2	39.5	21.3	34.0	LiC	2.01	0.40	0.30	1.31
11.8	1.3	12.2	0.6	2.6	23.5	35.0	39.0	LiC	2.30	0.40	0.35	1.16
2.9	1.1	3.2	0.5	13.2	48.7	20.3	17.8	CL	1.24	0.32	0.31	1.03
5.3	4.5	4.8	1.3	19.8	26.3	21.9	32.0	LiC	0.93	0.31	0.29	1.09
7.6	12.8	9.7	2.3	21.3	30.0	23.6	25.1	LiC	0.42	0.42	0.36	1.16
11.8	1.2	7.7	1.1	2.6	18.8	43.9	34.7	SiC	0.87	0.49	0.39	1.27
13.9	2.9	8.3	1.7	11.0	17.7	30.8	40.6	LiC	0.87	0.37	0.27	1.38
12.6	0.5	9.4	0.5	7.1	50.4	22.2	20.3	CL	1.12	0.33	0.27	1.23
5.5	2.5	4.2	0.5	44.4	23.1	18.6	14.0	SL	2.44	0.40	0.38	1.07
7.7	0.3	6.2	0.4	11.7	28.2	42.5	17.6	SiCL	0.68	0.31	0.25	1.26
16.8	0.8	11.1	0.6	16.7	30.1	27.7	25.6	LiC	0.88	0.39	0.27	1.46
7.1	1.7	4.4	0.5	19.2	28.4	27.0	25.4	CL	0.91	0.28	0.22	1.27
6.1	0.2	5.2	0.7	51.4	24.9	15.9	7.8	SL	1.48	0.37	0.26	1.42
4.5	0.4	3.7	0.5	19.3	39.2	30.8	10.7	L	0.92	0.35	0.31	1.12
10.7	1.2	7.3	0.8	4.3	24.8	39.0	32.0	LiC	1.08	0.43	0.35	1.24
8.2	1.2	5.7	0.7	7.1	32.4	36.9	23.6	CL	0.89	0.48	0.32	1.49
9.7	2.6	8.3	1.1	18.0	38.5	22.6	20.9	CL	0.51	0.31	0.28	1.10
8.7	1.1	6.3	0.3	7.9	15.2	39.5	37.4	LiC	0.53	0.46	0.32	1.41
6.9	0.7	9.7	0.8	2.8	10.4	49.2	37.6	SiC	0.91	0.36	0.29	1.26
1.5	0.8	2.0	0.3	49.1	30.1	14.2	6.6	SL	1.69	0.22		
1.9	0.7	2.4	0.4	27.3	33.5	24.0	15.2	CL	0.94	0.30	0.33	0.90

ニウム、ケイ素。
だことを示す)。

以上(砂含量 65% 未満)で堅いクラストができるとされているが、おおむね同様の傾向となっている。

以上のことを総合すると、クラストの硬さについては、シルト含量を中心とした土性、酸性シュウ酸塩可溶 Al やリン酸吸収係数に示される黒ボクの性質と有機物含量が土壌の性質として主に関係していると考えられる。

クラストの厚さでは、クラストの薄い部分の厚さと交換酸度が僅かに 5% 水準で有意な相関を示したが散布図ではきわめて曖昧で、その他の土壌の性質とも相関を示す項目はなかった。

亀裂の面積割合については、多くの土壌項目が有意な相関を示している。主な項目を見ると、砂合計が最も高い負の相関を示す(図-6)など、粘土、シルトを含めて粒径分布が関係している。そのほか、塩基合計、交換性 Ca, Mg が正、交換酸度が負など粘土含量・種類や塩基状態と関係がある項目が高い相関を示している。土性以外の項目の影響を見るために砂含量の回帰残差と土性以外の項目の相関を見たところ、交換酸度が高い負の相関(図-7)を示した。塩基不飽和(pH 7.0)の容量を示す交換酸度が大きいほど亀裂面積率が小さい傾向については

表-3 人工降雨によるクラスト発生試験結果

Table 3 Crust properties formed using a rainfall simulator.

no	サンプル名	透水性低下率 降雨条件		硬度計		土膜の厚さ		亀裂率 面積 %	総合 判定
		①	②	1 kg バネ	4 kg バネ	薄	厚		
				mm	mm	mm	mm		
#1	秋田八郎潟	0.87	1.00	14.6	2.1	7	9	8.1	1
#2	岩手盛岡	0.86	0.49	5.8	0.0	4	8	2.1	2
#3	山形鶴岡	0.84	0.68	13.8	1.8	7	10	2.5	1
#4	新潟長岡	0.59	0.76	8.1	0.5	5	7	3.0	1
#5	新潟上越	0.72	0.73	15.4	4.5	1	2	3.9	1
#6	富山	0.90	0.39	15.4	2.8	4	5	1.9	2
#10	石川金沢	0.93	0.71	16.3	1.5	7	11	2.4	1
#11	福井	0.77	0.91	19.6	12.9	6	8	4.2	3
#12	岐阜揖斐川	1.00	0.76	17.7	3.3	4	9	1.4	1
#14	三重安濃 U2	0.96	0.89	12.3	1.7	4	9	0.3	1
#15	三重安濃 V1	0.81	0.80	19.0	10.0	4	9	0.8	3
#16	福岡筑後	0.84	0.33	21.5	18.2	5	9	2.9	4
#17	茨城つくば	0.94	0.96	15.3	9.7	4	5	4.9	1
#18	滋賀	0.84	0.29	20.4	7.8	5	9	3.0	2
#19	新潟新発田	0.96	0.76	3.8	0.0	4	5	0.7	1
#20	広島	0.38	0.29	21.4	19.3	8	11	3.2	4
#21	福島	0.38	0.36	20.4	18.0	5	7	4.5	4
#22	愛知	0.91	0.58	19.5	8.2	4	6	2.2	1
#23	岡山	0.67	0.71	19.6	11.3	5	6	3.2	3
#24	香川四国	0.75	0.48	17.9	1.8	3	10	2.4	2
#25	佐賀	0.92	0.89	13.6	8.0	2	3	3.9	1
#26	鳥取	0.39	0.21	20.6	13.8	7	10	4.2	4
#27	北海道上川 1	0.51	0.42	19.0	7.0	6	7	2.2	2
#28	北海道上川 2	0.36	0.21	17.9	3.8	4	6	3.4	2
#29	北海道夕張	0.70	0.19	21.4	20.0	7	10	7.8	4
#30	新潟湖南	0.96	0.87	12.5	1.8	3	5	1.1	1
#31	石川松任	0.53	0.38	20.9	12.2	6	10	2.4	4

注：条件①および②は、降雨強度 19 mm/h, 37 mm/h。硬度と土膜の厚さは条件②で測定。亀裂率は平均。

総合判定の値は下の表による

最大透水低下	硬度 (4 kg バネ)	
	10 未満	10 以上
0.5 以上	1	3
0.5 未満	2	4

明確な理由は不明だが、有機物やアロフェンなど大きな変異荷電を示す物質を多く持つ土壌で塩基不飽和 (pH 7.0) が大きくなりやすいと考えられることから、無機有機コロイドの性質が関係していると推察される。

3.4 粘土鉱物とクラストの性質の関係

各サンプルの粘土鉱物の X 線反射ピークの区分、及

び主要粘土鉱物等の定性的相対比率を表-6 に示した。岩手盛岡の黒ボク土 (非晶質主体)、八郎潟と上越 (スメクタイト) で 1 種類の粘土鉱物が卓越していたが、そのほかのサンプルでは 1 種類の粘土が卓越することはなく、明瞭なピークが 2 種類以上認められた。

結晶性粘土鉱物の物理性に対する影響は、ある一定以

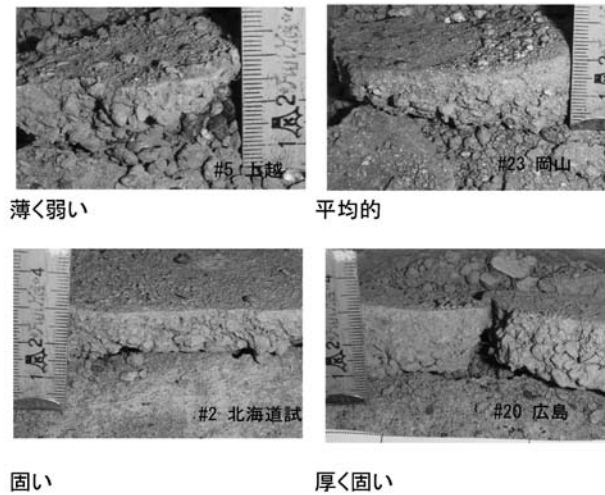


写真-2 人工降雨で生成したクラストの断面
 Photo 2 Crusts formed using a rainfall simulator.

表-4 クラストの性質間の相関
 Table 4 Correlation between crust properties.

	透水性低下率②	硬度 1kg バネ	硬度 4kg バネ	厚さ(薄)	厚さ(厚)	亀裂率
透水性低下率①	.6324***	-.4382*	-.4905**	-.3777 ⁺	-.1901	-.2689
透水性低下率②		-.4818*	-.4668*	-.3153	-.3305 ⁺	-.1051
硬度 1kg バネ			.7489***	.3504 ⁺	.3639 ⁺	.3067
硬度 4kg バネ				.3936*	.2430	.4243*
厚さ(薄)					.7521***	.3566 ⁺
厚さ(厚)						.0576

注：数字の後の記号は，+：10%，*：5%，**：1%，***：0.1%水準で有意を示す。

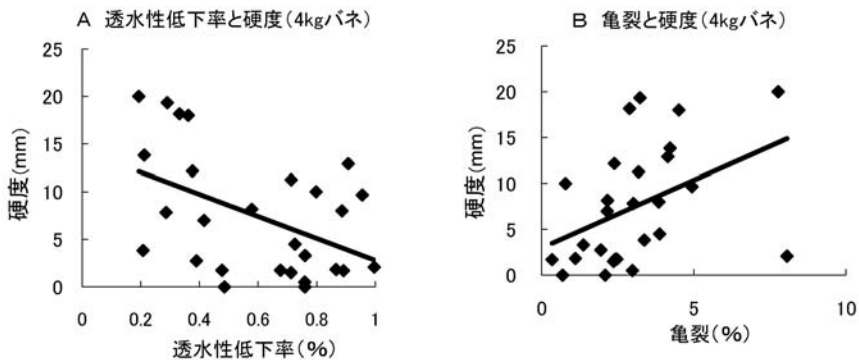


図-2 クラストの性質間の関係
 Fig. 2 Relationship between crust properties.

表-5 クラストの性質項目と土壌の理化学性間の相関

Table 5 Correlation between crust properties and soil physicochemical properties.

土壌項目	クラスト特徴 透水性低下率		硬度		厚さ		亀裂率	
	条件①	条件②	1 kg バネ	4 kg バネ	薄	厚		
pH	0.009	0.082	0.068	0.171	0.290	0.313	0.149	
全炭素	0.093	0.061	-0.387*	-0.178	-0.136	0.033	-0.146	
遊離酸化鉄 Fed	-0.195	-0.005	-0.037	0.188	-0.095	-0.233	0.370	
交換性	Ca	0.131	0.379 ⁺	-0.075	0.042	0.179	0.079	0.598**
	Mg	0.049	0.217	-0.044	0.083	0.193	0.098	0.529**
	K	0.247	0.224	0.158	0.016	0.128	0.160	0.246
	Na	-0.075	0.072	0.069	0.221	0.287	0.151	0.430*
	合計	0.124	0.366 ⁺	-0.060	0.063	0.207	0.100	0.633***
交換酸度	0.070	0.030	-0.274	-0.183	-0.380*	-0.088	-0.405*	
塩基交換容量	0.155	0.367 ⁺	-0.210	-0.048	0.008	0.052	0.399*	
リン酸吸収係数	0.172	0.299	-0.416*	-0.197	-0.044	0.003	0.139	
酸性シュウ酸可溶	Al _o	0.159	-0.004	-0.459*	-0.251	-0.147	0.028	-0.205
	Fe _o	-0.096	0.058	-0.215	0.010	-0.021	-0.077	0.319
	Si _o	0.138	-0.045	-0.444*	-0.225	-0.101	0.034	-0.102
	Mn _o	0.121	0.379 ⁺	-0.074	0.161	0.135	-0.126	0.478*
	Al _o +1/2Fe _o	0.117	0.009	-0.444*	-0.216	-0.132	0.008	-0.109
粒径組成	粗砂	0.138	0.167	-0.278	-0.224	-0.244	-0.256	-0.528**
	細砂	0.132	-0.057	0.037	-0.321	0.115	0.290	-0.470*
	シルト	-0.374 ⁺	-0.272	0.315	0.511**	0.193	0.094	0.634***
	粘土	0.025	0.272	0.071	0.131	0.136	0.022	0.622***
	砂計	0.190	0.089	-0.186	-0.378 ⁺	-0.109	-0.004	-0.704***
団粒の平均重量直径	0.456*	0.486**	-0.360 ⁺	-0.383*	0.017	-0.201	0.126	
pF 1.8	-0.063	-0.036	-0.396*	-0.159	-0.021	-0.032	0.219	
塑性限界 (PL)	0.223	0.127	-0.612***	-0.397*	-0.107	0.017	-0.073	
畑地化指数 (PL/pF 1.8)	-0.406*	-0.187	0.253	0.330	-0.008	-0.297	0.423*	

注: 数字の後の記号は, +:10%, *:5%, **:1%, ***:0.1%水準で有意を示す。

サンプル数は塑性限界と畑地化指数は砂質土壌で測定できなかったため25だが, それ以外は27。

上の粘土含量のときに現れる。また、黒ボク土では多量の有機物と非晶質画分の性質が物理性を大きく左右し、結晶性粘土鉱物の物理性に対する影響は少ないと考えられる。そのため、粘土含量15%以上の非黒ボク土のサンプル(20点)について、結晶性粘土鉱物とクラストの性質との関係を検討した。

クラストの性質と粘土鉱物の定性的相対割合の相関関係を表-7に示した。パーミキュライトは、降雨条件②の透水性低下率、1kgバネの硬度、4kgバネの硬度、亀裂平均など多くの項目において5%水準で有意の相関を示

した。カオリナイトは1kgバネの硬度と正の相関を示した。スメクタイトは1kgバネの硬度と10%水準で有意の相関を示した。雲母粘土鉱物と明瞭な相関を示すものはなかった。また膨張性、中間型、非膨張性にまとめた場合では、膨張性粘土鉱物が亀裂平均と10%水準で有意の相関を示したが、その他では有意な相関は認められなかった。

パーミキュライト、カオリナイトとスメクタイトのピーク強度と硬度との関係を比較したところ、パーミキュライトではピーク強度0、カオリナイトではピーク

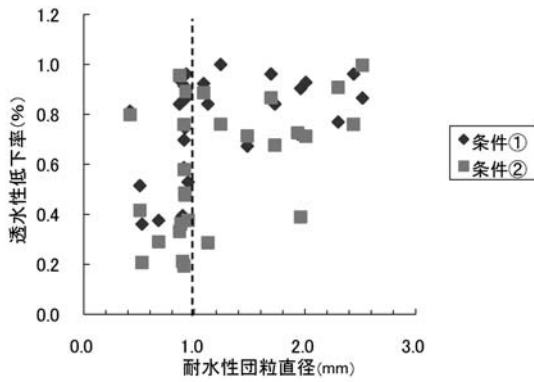


図-3 耐水性団粒と透水性低下率

Fig. 3 Relationship between aggregate stability and infiltration rates.

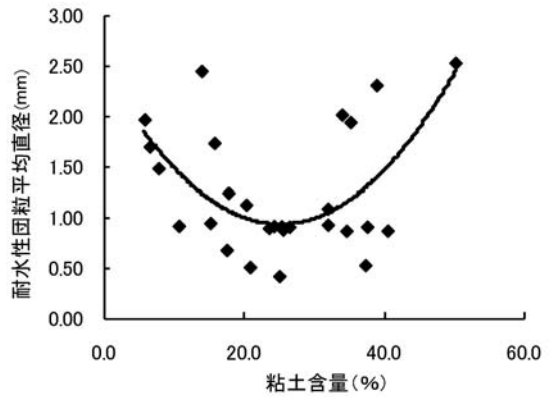


図-4 粘土含量と耐水性団粒直径の関係

Fig. 4 Relationship between clay contents and aggregate stability.

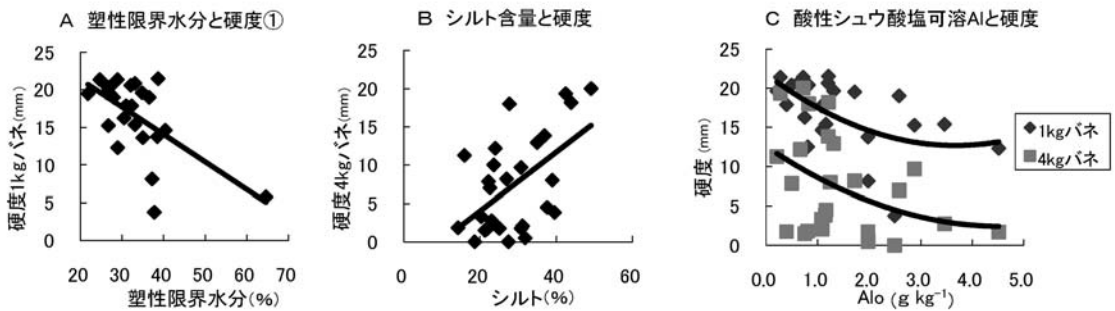


図-5 クラストの硬度と土壌特性の関係

Fig. 5 Relationship between hardness of crusts and soil properties.

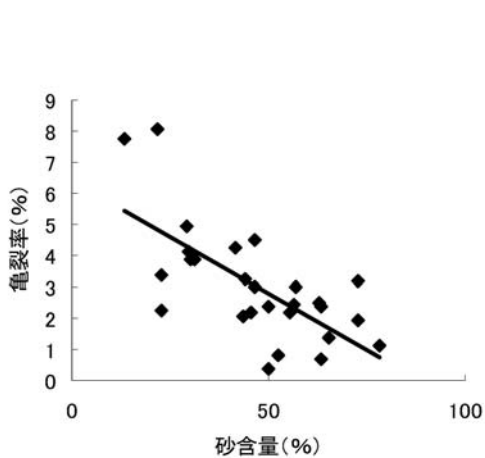


図-6 亀裂率と砂含量

Fig. 6 Relationship between crack area ratio of crusts and sand contents.

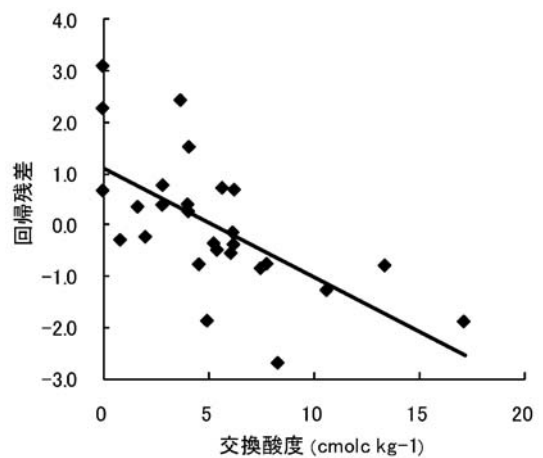


図-7 亀裂率の砂含量回帰残差と交換酸度

Fig. 7 Relationship between exchangeable acidity and residue of regression of crack area ratio on sand.

表-6 粘土鉱物のピーク強度と相対比率

Table 6 Clay mineralogy of soils

no	サンプル名	定性的判定 *1							粘土の定性的相対比率%						
		Kt	Mica	Chro	Verm	Smec	Ch-Vt	Ch-Sm	Qt	Kt	Verm	Smec	膨張性による区分*2		
												膨張性	中間型	非膨張性	
#1	秋田八郎潟	1			1	3			1	20	20	60	80	0	20
#2	岩手盛岡			1					1	0	0	0	0	0	100
#3	山形鶴岡	2	1	3		3			1	22	0	33	33	0	67
#4	新潟長岡	1	1	2		3			1	14	0	43	43	0	57
#5	新潟上越	1	1	1		3			1	17	0	50	50	0	50
#6	富山		1	3				1	2	0	0	0	0	20	80
#10	石川金沢	2	1		1	3			1	29	14	43	57	0	43
#11	福井	3	1	1	1	1	2	2	1	27	9	9	18	36	45
#12	岐阜揖斐川	3	2	2					1	43	0	0	0	0	100
#14	三重安濃 U2	2					3		1	40	0	0	0	60	40
#15	三重安濃 V1	2					3		1	40	0	0	0	60	40
#16	福岡筑後	2			1	3			1	33	17	50	67	0	33
#17	茨城つくば	3		1	2	1	2		1	33	22	11	33	22	44
#18	滋賀	3	2	1	2			1	1	33	22	0	22	11	67
#19	新潟新発田	3	1			1	2		1	43	0	14	14	29	57
#20	広島	3	2		2	2			1	33	22	22	44	0	56
#21	福島	2				1	3		1	33	0	17	17	50	33
#22	愛知	2	2	1	2	1			3	25	25	13	38	0	63
#23	岡山	3	2	1	2	1			1	33	22	11	33	0	67
#24	香川四国	3	1		2	1			3	43	29	14	43	0	57
#25	佐賀	2	1		2	3			1	25	25	38	63	0	38
#26	鳥取	3	1	1	2				2	43	29	0	29	0	71
#27	北海道上川 1	2	1		2	3			1	25	25	38	63	0	38
#28	北海道上川 2	3	1		2	1	2		1	33	22	11	33	22	44
#29	北海道夕張	2	1	1	3				2	29	43	0	43	0	57
#30	新潟湖南	2	1	1				3	1	29	0	0	0	43	57
#31	石川松任	3	2	1	2	1			2	33	22	11	33	0	67

注 *1: Kt: カオリナイト, Mica: 雲母粘土鉱物, Chro: 緑泥石, Verm: パーミキュライト, Smec: スメクタイト, Ch-Vt: 緑泥石-パーミキュライト中間体, Ch-Sm: 緑泥石-スメクタイト中間体, Qt: 石英。

*2: 膨張性はスメクタイトとパーミキュライト, 中間型は Ch-Vt と Ch-Sm, 非膨張性はカオリナイト, 雲母粘土鉱物と緑泥石を示す。

強度 1, スメクタイトではピーク強度 3 のサンプルで他のピーク強度に比べ 1 kg バネの硬度が低い (軟らかい) 傾向が認められた (図-8)。1 kg バネの硬度に比べ 4 kg バネの硬度との関係はやや不明瞭だが, 同様の傾向が認められる。

カオリナイトのピークが明瞭に出ない土壌で硬度が高くない点については, いくつかの理由が考えられる。1 つは, カオリナイトは膨潤収縮性が低く, 乾湿の変動がクラストの形状に影響を与えないためと考えられ

る。クラストは降雨により形成され, その後乾燥で硬化するため, 収縮率が大いだと亀裂ができやすく不安定になり硬度が低下するが, カオリナイトがその収縮をある程度の範囲に収める働きをすると考えられる。しかし, 膨張性のパーミキュライトもカオリナイトと類似した硬度の傾向を示すことから, この理由だけで説明されるとは考えにくい。一方, カオリナイトは今回供試したサンプルに他の粘土鉱物と共に一般的に含まれていて, 本実験で使用した土壌のうち粘土含量 15% 以上でカオリナ

表-7 粘土鉱物の定性的割合とクラストの性質の相関

Table 7 Correlation between clay mineralogy and crust properties.

クラスト特徴		Sm 割合	Kt 割合	Vt 割合	Mica 割合	膨張性	中間型	非膨張性
透水性低下率	条件①	.0894	-.0728	-.1777	-.0613	-.0118	-.0274	.0424
	条件②	.3187	-.3435	-.4652*	-.2859	.0299	.1749	-.2171
硬度	1 kg バネ	-.3967 ⁺	.4843*	.5161*	.2421	-.0634	-.0739	.1521
	4 kg バネ	-.2852	.3308	.4698*	-.0494	.0073	.0434	-.0537
厚さ	薄	-.0553	.1324	.2992	-.0017	.1195	-.1720	.0363
	厚	-.2375	.4104 ⁺	.1291	.1115	-.1481	-.0791	.2584
亀裂平均		.1564	-.2844	.4597*	-.3240	.4275 ⁺	-.1419	-.3616

注：Sm：スメクタイト，Kt：カオリナイト，Vt：パーミキュライト，Mica：雲母粘土鉱物。
粘土含量 15% 未満と黒ボク土を除いた。N=20
数字の後の記号は，+：10%，*：5%水準で有意を示す。

イトのピークが不鮮明な土壌は，スメクタイトが主体となるような場合（八郎潟，長岡，上越）に限られている。また，カオリナイトが明瞭なピークを示さないサンプルでは，パーミキュライトも明瞭なピークを示していない。そのため，カオリナイトやパーミキュライトが明瞭なピークを示さないと硬いクラストができなかったと言うことは，裏返せばスメクタイトだけが粘土鉱物の主体となっている土壌では硬いクラストができなかったことを意味しているとも考えられる。スメクタイトのピーク強度が3の場合，福岡筑後のサンプルを除き，4kg バネ硬度で高い値を示すものはなかった。福岡筑後のサンプルはスメクタイトと同時にカオリナイトもピーク強度2，パーミキュライトもピーク強度1を示しており，スメクタイトのみの性質が支配的とは考えられない。一般に，スメクタイトは膨張性や比表面積が大きく，粒径は小さい（日本粘土学会，1987）。スメクタイトの比率が非常に高い土壌ではスメクタイトの細かい粒径や大きな膨潤性・収縮性が顕著に現れて，クラストの生成，安定性や硬さに影響しているのではないかと考えられる。

粘土鉱物の種類とクラストの関係については，Stern *et al.* (1991) が，南アフリカの19サンプルを用いた人工降雨実験での透水性の低下と粘土鉱物について検討し，カオリナイトとイライトのみの場合に比べて，わずかでもスメクタイトが入っている場合の方が分散性は高いとしている。また，Wakindiki (2002) らは，ケニヤとイスラエルの5土壌を用いて人工降雨でクラストの性質を検討した結果，カオリナイト質の土壌（Oxisol (Soil Taxonomy)）は高い団粒安定性と低い分散性を示し土壌の侵食も少なく，モンモリロナイト質の土壌で低い団粒安定性と厚いクラスト生成，高い侵食量を示すことを報告している。FAO (1998) ではこれらの結果を元に「スメク

タイトはカオリナイト鉱物に比べより分散しやすい」，そのためスメクタイト質の土壌でクラストができやすいとまとめている。クラストの硬さと粘土鉱物との関係に関しては，2:1型の粘土鉱物タイプの土壌で破壊係数が大きい（Lemos *et al.*, 1957）という結果や，スメクタイト質の土壌を用いてクラストの発生や硬さの検討を行っている例（Taki, 2006）が多数あり，スメクタイト質でも硬いクラストはできる事を示している。

今回の結果と海外での報告例を比較すると，土壌の分散性，透水性低下率のデータで指摘されているスメクタイトの効果や，カオリナイト質で団粒安定性が高い傾向が認められない。Stern *et al.* の研究では，半乾燥地を中心とした土壌（Alfisol, Aridisols, Mollisol）が主に使われており，対象としたスメクタイト質のサンプルも乾燥地域のイスラエルのものである。また，Wakindiki *et al.* が用いたカオリナイト質土壌は，強風化環境で特徴的にみられる Oxisols で，鉄，アルミニウムの影響で団粒の安定性が高いとされている土壌である。世界的にみると，乾季雨季を持つ地域のスメクタイト質で高い粘度含量を持つ土壌の多くは Vertisols に分類される。一般的に Vertisols は団粒安定性が高くクラストはできにくい，一方レス性の土壌はクラストが問題になりやすいと言われている（Ben-Hur *et al.*, 2002）。半乾燥地の土壌を用いた場合にスメクタイトの高い分散性が見いだされているのは，レス性の土壌が多く使われた結果とも考えられ，これがスメクタイト質土壌ではクラストができやすいとされる根拠になったと思われる。

クラストの硬さについて，今回の結果で認められたスメクタイトのピーク強度が3で，カオリナイトやパーミキュライトの明瞭なピークが現れない土壌で硬いクラストが少なかった傾向は，世界的に見ると普遍的ではない

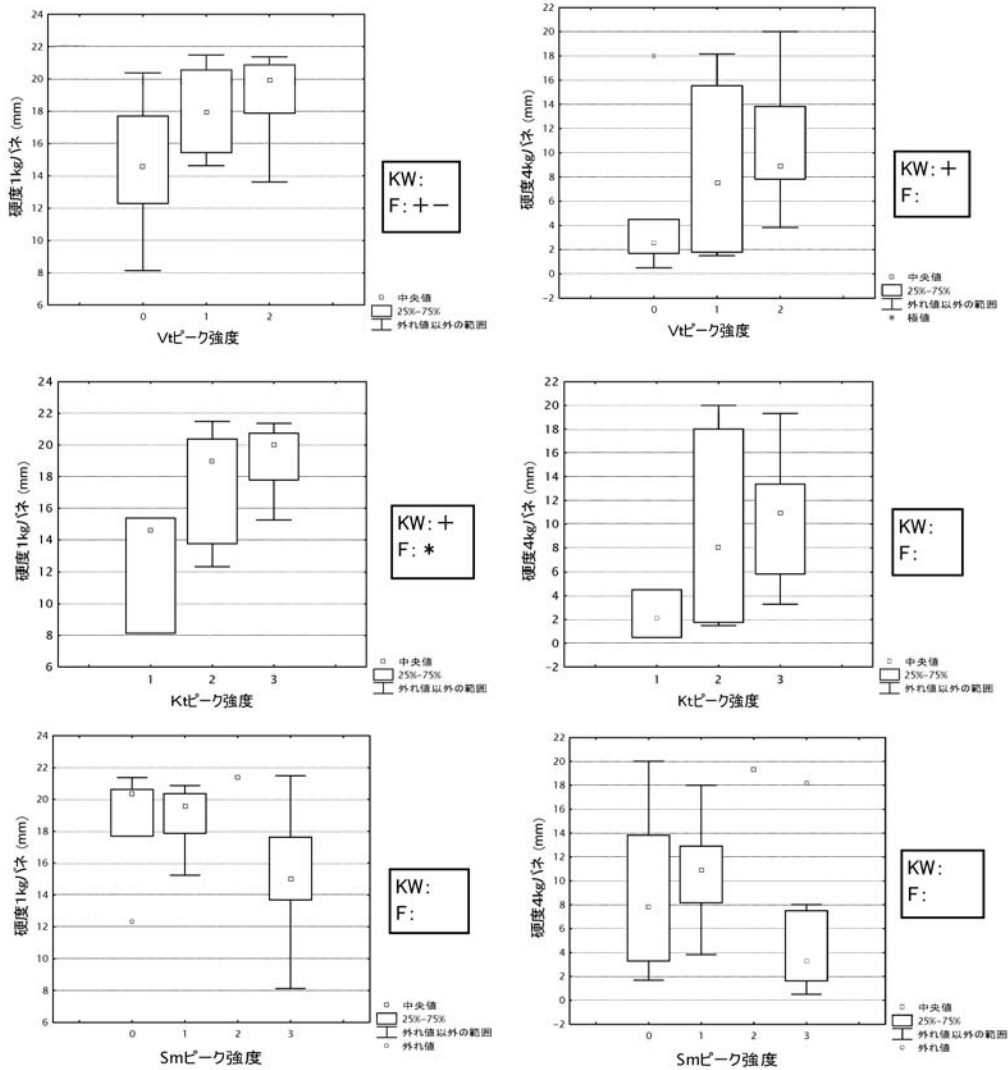


図-8 パーマキュライト (Vt), カオリナイト (Kt) とスメクタイト (Sm) のピーク強度と硬度の関係

Fig. 8 Relationship between hardness of crusts and X-ray diffraction peak intensity of vermiculite, kaolinite and smectite.

と考えられる。北陸研究センターの水田圃場の土壌はスメクタイト以外明瞭なピークを示さない土壌だが、現場観察からすると転換直後に一度乾燥して収縮した土塊はかなりの降雨でも分散・崩壊することはない。これは、粘土含量が35%と高く、遊離鉄も1.69%と比較的高いなど粘土鉱物性以外にも要因はあると思われるが、転換直後で耕起・乾燥を経て一度硬化した土塊は堅固で、容易にクラストが発生するとは考えられない。今回供試した北陸研究センターの圃場や八郎潟の水田圃場のような粘土鉱物をスメクタイトが占めるタイプの土壌は、日本

には長い乾期が無いいため Vertisols には分類されないが、Vertisols 的な性質が強く、スメクタイト質ではあるが土壌の安定度が高く、クラストができにくかったと考えられる。

また、海外の土壌の場合、基本的に畑状態の土壌を用いていて、今回用いた水田作土では一定の湛水期間を持ち酸化還元を繰り返すため、余分な塩類も流され鉄の形態も異なる (高橋, 2002) と考えられる。

これらの理由によって、海外でいわれているカオリナイト質でクラスト耐性が強い傾向やスメクタイト質でク

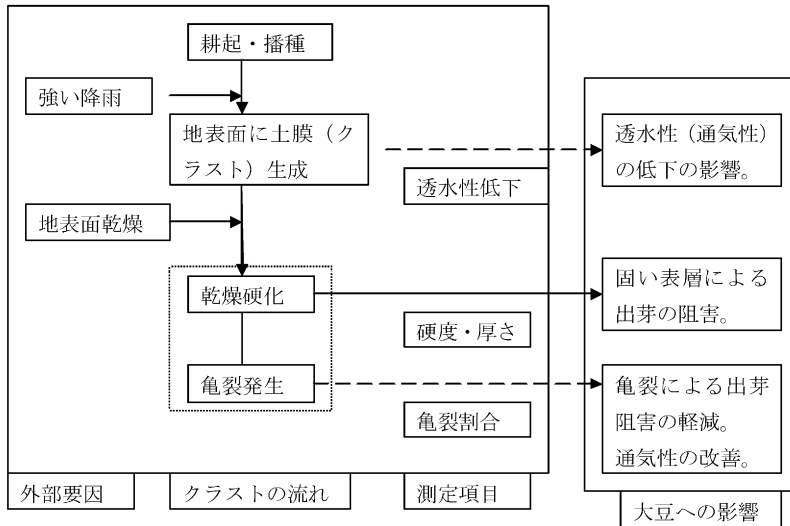


図-9 クラスト形成と大豆出芽阻害の関係（想定）

Fig. 9 Image of relation among crust formation and soy bean emergence.

ラストができやすい傾向などが、今回の試験では認められなかったと考えられる。

3.5 クラストによる大豆の出芽阻害危険性と土壤の性質

大豆の出芽阻害とクラストの発生・性質の関係を、図-9の様想定した。クラストは耕起・播種後の強い降雨により発生する。この現象は透水性の低下に示される目詰まりの程度で評価した。この段階では直接的な大豆出芽阻害は無いと考えられるが、透水性や通気性の低下が湿害を助長するなど、間接的な影響は懸念される。

また、降雨後乾燥が進むとクラストが硬化し、土壤によっては大豆の出芽を阻害するが、出芽が阻害される硬度についてはクラスト硬度計を基準とした値が各地で調べられている。北海道立農試の成績書（2005.1）によると、転換畑土壤ではクラスト硬度計で10 mm（4 kg バネ使用時、硬度約 350 kPa）以上で出芽阻害が始まるとされ、300A 東海大豆研究チームでは、クラスト硬度 370～570 kPa のクラストができた圃場で出芽不良が認められている（農林水産技術会議，2007）。また北海道の畑地の改良に関係して、クラスト硬度 800 kPa 以下と言う改良判定値も提案されている（横井，2006）。

北海道立農試の 4 kg バネ硬度 10 mm 以上、透水性の低下率 50% 以下（降雨条件①，②のどちらか低い方）の基準によって今回供試したサンプルを 4 区分（表-3 の総合判定）した。27 サンプル中硬度・透水共に悪条件となるサンプルは 6 地点、硬度は大きい透水性の低下はあまり起こらないサンプルは 3 地点、透水性は下がるが固

くならないサンプルが 6 地点、12 地点は硬度・透水性共に問題が認められないと考えられた。透水性は下がらないが固くなるサンプルについては、その堅さの原因がクラストにあるのかどうか不明で、固結による土塊相互間の結合の可能性等も考慮すべきと考えられる。

今回の実験では厚い緻密部位がいくつかのサンプルで観察されたが、層全体がスレーキングにより崩壊しハードセッティングが起こったケースである可能性がある。ハードセッティングは主にオーストラリアで使われている用語で、「乾燥すると、緻密で固く見かけは無構造。人差し指で押しでも表面が乱れずへこまない。土膜は必ずしも伴わない。」とオーストラリア土壤土地調査ハンドブックで定義されている（McDonald *et al.*, 1990）。ハードセッティングは乾燥・半乾燥地帯では大きな問題で、降雨や灌漑の後に播種床全体が崩壊（collapses）し、その後の乾燥で表層から乾燥しハードセッティングを起こした場合、表層のクラストだけができた場合よりもより深刻な出芽障害を起こすと言われている（Taki *et al.*, 2006）。ハードセッティングは、クラストと同時に起こる場合もあるが単独で起こる場合もある。また、原因も降雨に加えて灌漑もとりあげられており、強い降雨が無くても水に浸かるような場合（転換畑の場合しばしば起こる）に起こりうると考えられ、また解決策も必ずしもクラストと同一ではないと考えられる。今後、クラスト（薄い土膜）以外にも、より厚い硬化・緻密部分ができている場合には、ハードセッティングの可能性も検討する必要があると考えられる。

表-8 大豆出芽におけるクラスト危険性評価と土壌の性質の対応

Table 8 Soil properties for crusting risk estimation on soybean emergency.

クラストの性質危険	実験結果	危険性判断のための土壌の性質と値											
		団粒安定性	土性					黒ボクの性質		有機物	粘土鉱物ピーク強度		
			平均重量直径	砂	シルト	粘土		Al _o	リン酸吸収係数	炭素	Kt	Vt	Sm
						1.0 mm 未満	65% 未満						
透水性低下 大	正判定率(%)	44	67	35	100	58	50	53	55	45	45	56	53
	N	12	15	23	3	12	22	17	20	22	22	16	19
透水性低下 小	正判定率(%)	56	83	75	63	67	80	70	86	60	60	73	75
	N	15	12	4	24	15	5	10	7	5	5	11	8
硬度 大	正判定率(%)	33	47	48	100	42	36	47	35	36	41	44	42
	N	9	15	23	3	12	22	17	20	22	22	16	19
硬度 小	正判定率(%)	67	83	75	75	73	80	90	71	80	100	82	88
	N	18	12	4	24	15	5	10	7	5	5	11	8

亀裂に関しては、硬いクラストができた場合でも種子の上に大きな亀裂が入ると大豆は亀裂から出芽できる。本実験では、亀裂率は0.3%~8.9% (平均3.1%) と大きな幅を示した。亀裂率の大きいサンプルでは硬いクラストによる出芽障害の低減が期待できる。しかし、亀裂の効果は播種位置との位置関係が重要であり、Takiらは収縮性の土壌で種子上に亀裂を発生させる機械的方法を検討している (Taki *et al.*, 2006)。国内でも、土屋らはクラストができて種子の上にひびを入りやすくし、大豆を出芽させる山型鎮圧を提案している (農林水産技術会議事務局, 2007)。また一方では、亀裂により透水性・通気性も改善すると考えられる (Ben-Hur *et al.*, 1985b)。

これまでの結果を総合して、透水性の低下と硬度によるクラスト危険性を判断するために有効と思われる土壌の性質を、表-8に整理した。各土壌の性質について、効果的にクラスト危険性が大きいサンプルを区分できると考えられる値の範囲 (判定基準) を、散布図等から選定した。一方、測定値が判定基準の範囲外にある場合は、クラスト危険性が少ない条件下にあると考えた。また、今回使用した27サンプルをそれぞれの判定基準で区分した場合に該当したサンプル数 (N)、そのうち危険性の大・小が、透水性 (50%以下)、硬度 (4kg バネで10mm以上) の基準で区分した危険性「大」・「小」に対して、正しく判定された割合 (正判定率%) を計算した。

正判定率をみると、透水性の低下の大きいサンプルは団粒平均直径、シルト含量、酸性シュウ酸塩可溶 (Al_o) の判定基準で比較的良好に区分されている。また透水性の問題がないサンプルは、団粒平均直径、粘土含量10-

40%、リン酸吸収係数、の判定基準で80%以上の正判定率で区分された。

硬度については、硬いクラストのできやすい土壌を選ぶ判定基準として、シルト含量 (3点と数が少なく信頼性は低い) が、次いで酸性シュウ酸塩可溶 Al_o が比較的高い正判定率を示した。また、硬くならないクラストができる土壌を見いだす判定基準では、元々の割合が67%と高いので正判定率も高く出ているが、カオリナイトピーク強度2+未満、スメクタイトピーク強度3+も高い正判定率を示し、そのほか、団粒平均直径、パーミキュライト、砂含量、粘土含量10-40%、全炭素なども比較的高い正判定率を示した。

現場で生成するクラストの性質は、降雨前の土壌の水分状態や土塊の大きさ、降雨強度、降雨後の天候など多様な条件が複合的に関係する。今回の実験は4mm以下に箭別した風乾土を用いた結果であり、また個々の土壌の性質で単純に生成するクラストの性質を予測することは難しい。しかしながら、利用できるデータの種類に応じて表-8のような判定基準を組み合わせることで、限定的ではあるが危険度の高い圃場 (あるいは危険性の低い圃場) を推定していくことができると考えられる。

謝 辞

本研究を行うにあたり、粘土鉱物分析では、上越教育大学の長岡孝信先生と山縣耕太郎先生に、X線分析装置の使用から解析の助言までご協力頂きました。また、サンプルの収集では、各地の試験研究機関にご協力頂きま

した。さらに、中央農業総合研究センター・北陸研究センター、業務第4科の矢崎孝司、関口 誠両氏には、人工降雨装置を作成して頂きました。ここに記し、心より感謝いたします。

文 献

- Asgedom, G.G. and Hasegawa, S. (2005) : The effect of raindrop impact and initial soil conditions on surface crust formation. 土壌の物理性, **100** : 65-75.
- Ben-Hur, M., Assouline (2002) : Tillage effects on water and salt distribution in a Vertisol during effluent irrigation and rainfall. *Agronomy J.*, **94** : 1295-1304.
- Ben-Hur, M., Shainberg, D., Bakker, D. and Keren, R. (1985a) : Effect of soil texture and CaCO₃ content on water infiltration in crusted soil as related to water salinity. *Irrigation Science*, **6** : 281-294.
- Ben-Hur, M., Sheinberg, I., Keren, R. and Gal, M. (1985b) : Effect of water quality and drying on soil crust properties. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, **49** : 191-196.
- Bennett, O.L., Ashley, D.A. and Doss, B.D. (1964) : Methods of reducing soil crusting to increase cotton seedling emergence. *Agronomy J.*, **56** : 162-165.
- Bresson, L.M., (1995) : A review of physical management for Crusting control in Australian cropping system. Research opportunities. *Aust. J. Soil Res.*, **33** : 195-209.
- Cattle, S., Cousin, I., Darboux, F. and Le Bissonnais, Y. (2004) : The effect of soil crust ageing, through wetting and drying, on some surface structural properties. Super soil 2004 : 3rd. Australian New Zealand Soils Conference, 5-9 December 2004, Univ. of Sydney, Australia. CDROM, Website www.regional.org.au/au/asssi
- Chartres, C.J., Kirby, J.M. and Raupach, M. (1990) : Poorly ordered silica and aluminosilicates as temporary cementing agents in hard-setting soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, **54** : 1060-1067.
- 土壌環境分析法編集委員会 (1997) : 土壌環境分析法. 博友社, pp. 1-418, 東京.
- FAO (1998) : Topsoil characterization for sustainable land management. Land and Water Development Division Soil Resources, Management and Conservation Service. pp. 16-17, Roma.
- ヒレル著, 岩田進午・内島善兵衛監訳 (1998) : 環境土壌物理学. 耕地生産力の向上と地球環境の保全 I 土と水の物理学. 農林統計協会, pp. 144-145, 東京.
- Holder, C.B. and Brown, K.W. (1974) : Evaluation of simulated seedling emergence through rainfall induced soil crusts. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.*, **38** : 705-710.
- 岩渕哲也・尾形武文・田中浩平 (2006) : ダイズの出芽・苗立ち安定のための3粒点播栽培に関する研究—1穴播種粒数が芽ばえの抽出力に及ぼす影響—. *日作紀* **75** (2) : 132-135.
- 亀和田國彦 (2001) : pH 7.0 1.0 MKCl 交換酸度による簡易な CEC 測定法. *土肥誌*, **72** (4) : 550-553.
- Lado, M., Ben-Hur, M. and Shainberg, I., (2004) : Soil wetting and texture effects on aggregate stability, seal formation, and erosion. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, **68** : 1992-1999.
- Le Bissonnais Y. (1996) : Aggregate stability and assessment of soil crustability and erodibility : I. Theory and methodology. *European J. of Soil Science*, **47** : 425-437.
- Lemos, P. and Lutz, J.F. (1957) : Soil crusting and some factors affecting it. *Soil Sci. Soc. Proc.*, **21** : 485-491.
- McDonald, R.C., Isbell, R.F., Speight, J.G., Walker, J. and Hopkins, M.S. (1990) : Australian soil and land survey, Field Handbook. CSIRO, pp. 141-142, Canberra Australia.
- Morin, J., Goldberg, D. and Seginer, I. (1967) : A rainfall simulator with a Rotation Disk. *Transaction of the ASAE*, 74-77.
- Nishimura, T., Nakano, M. and Miyazaki, T. (1999) : Effects of clod size, raindrop size and initial moisture conditions on surface sealing of Kunigami mahji soil. 農業土木学会論文集, 199 : 17-22.
- 日本粘土学会編 (1987) : 粘土ハンドブック第二版, 技報堂, pp. 131-150, 東京.
- 農林水産技術会議事務局 (2007) : 新鮮でおいしい「ブランド・ニッポン」農産物提供のための総合研究 2系 大豆. pp. 109-112, 169-171, 東京.
- Rathore, T.R., Ghildyal, B.P. and Sachan, R.S. (1981) : Germination and emergence of soybean under crusted soil conditions. I. Effect of crust impedance to seedling emergence. *Plant and soil*, **62** : 97-105.
- Rolston, D.E., Bedaiwy, M.N. and Louie, D.T. (1991) :

- Micropenetrometer for in situ measurement of soil surface strength. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, **55** : 481-485.
- 佐川 了・千田広幸 (1991) : 大豆の出芽に対する土壌クラストの影響. *日作東北支部報*, **34** : 49-51.
- Stern, R., Ben-Hur, M. and Sheinberg, I. (1991) : Clay mineralogy effect on rain infiltration, seal formation and soil losses. *Soil Science*, **152-6** : 455-462.
- 高橋智紀 (2002) : 非晶質鉄化合物の形態変化を利用した水田転換畑の畑地土壌化指標. *土肥誌*, **73** : 41-44.
- 高橋智紀・細川 寿・松崎守夫 (2008) 重粘質転換畑における土壌鎮圧によるダイズ種子の吸水促進効果. *土肥誌*, **79** : (印刷中)
- Taki, O., Godwin, R.J. and Leeds-Harrison, P.B. (2006) : The creation of longitudinal cracks in shrinking soils to enhance seeding emergence. Part I. The effect of soil structure. *Soil Use and Management*, **22** : 1-10.
- Tanaka, U., Yokoi, Y. and Kyuma, K. (1992) : Morphological characteristics of soil surface crusts formed under Simulated Rainfall. *Soil Sci. Plant Nutr.*, **38** (4) : 655-664.
- 田中 樹 (1995) : 土壌クラストの形成機作とそれに影響を及ぼす諸条件. *土壌の物理性*, **71** : 17-21.
- Updhyaya, S.K., Sakai, K. and Glancey, J.L. (1995) : Instrumentation for in-field measurement of soil crust strength. *Transaction of the ASAE*, **38** : 39-44.
- Wakindiki, I.I.C. and Ben-Hur, M. (2002) : Soil mineralogy and texture effects on crust micromorphology, infiltration, and erosion. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, **66** : 897-902.
- 横井義雄・長谷川進・坂本宣崇 (1998) : 北海道上川地方の堅密固結性土壌に対する砂質火砕流堆積物の客土効果. *土肥誌*, **69** (6) : 644-648.
- 横井義雄 (2006) : 砂質火砕流堆積物の客土によるクラスト形成の抑制を主体とした畑土壌の物理性改善技術. *土壌の物理性*, **103** : 3-12.

要 旨

大豆は水田の転換作物として広く全国的に栽培されているが、東海、西南日本、北海道等でクラストによる発芽不良が問題となっている。本研究では、土壌の性質からクラストの障害が起りやすさを推定する上での基礎的知見を得るため、全国から収集した土壌 27 点を用いて、人工降雨装置によりクラスト発生させ、その特徴と土壌の理化学性・粘土鉱物との関係を調べた。37 mm/時の人工降雨により、全サンプルで形態的にはクラストと見なされるもの (2 サンプルでは部分的) が形成された。クラストの性質と土壌の性質の間では、透水性低下率は耐水性団粒平均直径との間で最も高い相関を示した。クラストの硬度は、シルト含量と正の相関、酸性シュウ酸塩可溶 Al と負の相関を示した。亀裂面積は主に粒径組成と相関が認められた。クラストの性質と粘土鉱物との関係では、カオリナイトとパーミキュライトの X 線ピークが不明瞭な土壌及びスメクタイトのピークがきわめて明瞭な土壌で硬度が低いという関係が認められた。

受稿年月日 : 2007 年 8 月 6 日

受理年月日 : 2008 年 4 月 20 日