

- erties as affected by twelve annual applications of cattle feedlot manure. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, **51**, 7~9 (1987)
- 25) Ekwue, E. I. : Effect of organic and fertiliser treatments on soil physical properties and erodibility. *Soil Tillage Res.*, **22**, 199~209 (1992)
- 26) Kumar, S., Malik, R. S. and Dahiya, I. S. : Influence of different organic wastes upon water retention, transmission and contact characteristics of a sandy soil. *Aust. J. Soil Res.*, **23**, 131~136 (1985)
- 27) Marsh, J. D. M. and Rixon, A. J. : Effects of heavy additions of organic residues on physical characteristics of three soil types in Queensland, Australia. *Soil Tillage Res.*, **20**, 109~122 (1991)
- 28) Tester, C. F. : Organic amendment effects on physical and chemical properties of a sandy soil. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, **54**, 827~831 (1990)
- 29) Tiarks, A. E., Mazurak, A. P. and Chesnin, L. : Physical and chemical properties of soil associated with heavy applications of manure from cattle feedlots. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.*, **38**, 826~830 (1974)
- 30) Hafez, A. A. R. : Comparative changes in soil-physical properties induced by admixtures of manures from various domestic animals. *Soil Sci.*, **118**, 53~59 (1974)
- 31) 保井聖一・筒木 潔・明石憲宗・木村義彰：乳牛ふん尿スラリー施用による土壌団粒形成メカニズム—スラリーの物理性と腐植物質組成が有機・無機複合体の形成に及ぼす影響—, *土肥誌*, **76**, 277~284 (2005)

Effects of the Application of Cow Manure Slurry on the Formation of Soil Aggregates and Physico-Chemical Properties of Soils

Seiichi Yasui, Kiyoshi Tsutsuki, Norimune Akashi* and Yoshiaki Kimura**

(*Obihiro Univ. Agric. Vet. Med.*, **Zukosha Co. Ltd.*, ***Hokkaido Pref. Cent. Agric. Exp. Stn.*)

Slurries with different chemical characteristics were applied to the soil packed in Wagner pots. Used slurries were untreated cow manure slurry, aerated slurry, and anaerobically digested slurry. Plots treated with compost and chemical fertilizers were also installed for the control. The ratio of humic substances to the total carbon was higher in the order of digested slurry > aerated slurry, untreated slurry >> compost. These materials were mixed in the upper 9 cm of the soil in the pots, while the amounts of carbon contained in these materials were adjusted to the same amount. Three consensive crops of *Brassica campestris* subsp. *napus* var. *komatsuna* were grown in these pots. Application of slurries increased the organic matter contents and CEC of the soil, as did compost. The number of fungi colonies and the weight of crop roots also increased remarkably due to the slurry application. The application of slurry also increased remarkably the amount of macro aggregate (> 250 μ m) in the soil, and the amount was larger in the order of digested slurry > aerated slurry > untreated slurry > compost. When macro-aggregate was disaggregated, both the particulate organic matter fraction (> 53 μ m) and mineral-associated organic matter fraction (< 53 μ m) increased in the slurry-treated plots, while the increase in the mineral-associated organic matter fraction was tremendous. The distribution of carbon among aggregates with different sizes revealed that the carbon was accumulated in the mineral-associated organic matter fraction in the macro-aggregates in the slurry applied plots, which was presumed to be due to the contribution of fine humic substances in the slurry. On the other hand, when compost was applied to soil, only the weight and carbon contents of particulate organic matter fraction in the macro-aggregate increased, but this did not lead to the formation of macro-aggregate. Weights of crop roots and the numbers of fungi colonies both showed positive correlations with the amount of macro-aggregate. Application of slurries also brought about the decrease in soil bulk density, and the increase in porosity for gravitational water and saturated permeability. As shown above, the application of slurries improved physico-chemical characteristics of soils, which was caused by the increase in mineral-associated organic matter fraction due to the humic substances contained in the slurries as well as due to the formation of macro-aggregates, due to the increase in the number of fungi colonies and the weights of crop roots. These mechanisms were different from the mechanism estimated in the case of compost application.

Key words cow manure slurry, humic substances, macro aggregate, fungi, crop root

(*Jpn. J. Soil Sci. Plant Nutr.*, **76**, 269-276, 2005)

乳牛ふん尿スラリー施用による土壤団粒形成メカニズム*1

—スラリーの物理性と腐植物質組成が有機・無機複合体の形成に及ぼす影響—

保井聖一*2・筒木 潔*2・明石憲宗*3・木村義彰*4

キーワード 乳牛ふん尿スラリー, スラリーの物理性, 有機・無機複合体, 腐植物質, 団粒形成メカニズム

1. はじめに

土壤構造の発達には、土壤の通気性や保肥力を向上させ、作物の生産性を向上させる¹⁾だけでなく、土壤環境の急激な変化を緩衝し、風食や水食などの浸食を防ぐ役割も担っている²⁾。一般に、土壤団粒はマクロ団粒 (>250 μm) とミクロ団粒 (<250 μm) に区分され、いずれの団粒の形成にも腐植物質、微生物および作物根が密接に関与している³⁾。堆きゅう肥連用試験⁴⁾によると、きゅう肥連用によって土壤有機物量が増加し、これに伴ってマクロ団粒が形成される。また、このマクロ団粒を、粗粒有機物画分 (>53 μm) と有機・無機複合体画分 (<53 μm) に粒径分画した試験⁴⁾では、有機物の増加は主に粗粒有機物画分で起こることが示されている。

著者らが行った乳牛ふん尿スラリーの施用試験⁵⁾においても、有機物の増加とマクロ団粒の形成が認められ、それに伴って土壤理化学性が改善された。しかし、マクロ団粒の粒径分画および炭素分布を調べたところ、炭素の増加は主に有機・無機複合体画分で生じており⁵⁾、堆きゅう肥の場合と異なっていた。この要因として、供試したスラリーの腐植組成や物理性の違いが団粒形成に影響を及ぼしたと推測した。しかしながら、供試したスラリーの物理性は詳細に検討されておらず、またスラリー由来の腐植物質が実際に有機・無機複合体に集積したかどうかについては未確認であった。

本研究では前報⁵⁾にて供試したスラリーについて、含まれる固形物の粒径分画試験、粘性特性試験、土壤浸透試験を実施し、物理的性質を明らかにした。また、スラリー施用土壤において、マクロ団粒を構成する有機・無機複合体から腐植物質を抽出し、その化学的特徴から腐植物質の由来を推定した。さらに、これらの結果から、乳牛ふん尿スラリー施用による土壤団粒形成メカニズムを、堆きゅう肥の場合と対比しながら考察した。

*1 乳牛ふん尿スラリーの畑地土壤への施用効果 (第2報)
本報告の一部は2004年度日本土壤肥料学会北海道支部大会において発表した。

*2 帯広畜産大学 (080-8555 帯広市稲田町西2線11)

*3 株式会社ズコーン (080-0048 帯広市西18条北1丁目17)

*4 北海道立中央農業試験場 (069-1395 北海道夕張郡長沼町東6線北15号)

2004年12月14日受付・受理

日本土壤肥料学雑誌 第76巻 第3号 p.277~284 (2005)

2. 試料および方法

1) 供試スラリーおよび堆肥

前報⁵⁾においてポット試験に用いた未処理液、曝気処理液、消化液および堆肥を分析に供した。これらの試料の水分、全炭素などの一般理化学性および腐植物質割合は前報⁵⁾において報告した。

2) スラリーおよび堆肥の物理性

(1) 固形物の粒径組成

粒径組成は青山らの方法⁶⁾を一部改変して行った。すなわち、スラリー150 mLに蒸留水を加えて約1 Lとし、ステンレス容器中に設置した2,000 μm のふるい上に流し込み、水中し別した。ふるいを通じた懸濁液は同様に、1,000, 500, 250, 106, 53 μm のふるいを用いて順次水中し別した。ふるい上の固形物は蒸留水で洗浄し、洗浄液は懸濁液に合わせた。53 μm のふるいを通じた懸濁液は洗浄水と合わせて約2 Lとし、十分に懸濁させた後20°Cの条件で4時間静置した。静置後、サイホンを用いて上澄み液を採取し、残った沈降物を集めた。上澄み液は10,000 $\times g$ で遠心分離し、沈降部と水溶性画分に分画した。分離したすべての画分は40°Cで通風乾燥して重量を測定した。堆肥については、現物30 gに蒸留水を加えて約1 Lとして、スラリーと同様の操作を行った。各画分の名称は、粒径の大きいほうからF1~F9とした。これらの操作は2連で実施し、結果は平均値で表した。

(2) スラリーの流動特性

スラリーは非ニュートン擬塑性流体であるため⁷⁾、水分量や含水比などから流動特性を評価することはできない。そのため、ここではB型粘度計を用いた流動性評価を試みた。各スラリー500 mLを500 mL容トルビーカーに入れ、スラリー温度を20°Cに調整した後、内筒回転型粘度計(東機産業株式会社製B型粘度計)によりズリ速度とズリ応力を測定した。ズリ速度は粘度計における回転速度であり、ズリ応力はズリ速度に対する抵抗を示す。本研究では、ズリ速度を段階的に変えてそれに対応するズリ応力を測定し、これらの関係からスラリーの流動曲線⁷⁾を作成した。この流動曲線の結果に基づき、スラリーの流動特性を評価した。

(3) スラリーの土壤浸透性

内径50 mm、高さ51 mmの100 mL容ステンレス採土管に、前報⁵⁾のポット試験で供試した褐色低地土(風乾

土)を風乾土容積重装置⁹⁾によって充填した。その後、採土管の土壤表面に各スラリー10 mLを添加して3, 6, 12, 24時間後に添加したスラリー残さを採土管の表面からナイフで切除し、採土管の重量を測定した。スラリーを施用する前の採土管との重量差を求め、土壤へのスラリー浸透率を算出した。また、堆肥5 gを同様に処理して比較した。

3) マクロ団粒の有機・無機複合体から抽出した腐植酸の化学性

(1) 有機・無機複合体の分画

前報⁵⁾のポット試験における化学肥料区、堆肥区、未処理液区、曝気処理液区および消化液区で得られたマクロ団粒(>250 μm)を供試した。マクロ団粒からの有機・無機複合体(<53 μm)の分離はAoyamaら⁴⁾の方法にほぼ準拠した。すなわち、風乾処理したマクロ団粒5 gを100 mLポリビンに入れ、直径6 mmのガラスビーズ5個および脱イオン水50 mLを加え、16時間振とうして水中分散した。振とう後、懸濁液を53 μmのふるいに通過させ、通過した懸濁液を40°Cで通風乾燥して有機・無機複合体画分を得た。

(2) 有機・無機複合体、スラリーおよび堆肥からの腐植の抽出

炭素100 mgに相当する有機・無機複合体を50 mL容ナルゲン管に採り、0.1 mol L⁻¹水酸化ナトリウム20 mLを添加し、室温で1時間振とうして腐植を抽出した。その後、16,000×gで10分間遠心分離し、アルカリ抽出液と抽出残さに分けた。抽出残さに0.1 mol L⁻¹水酸化ナトリウム20 mLを再び加え、数分間振とう後同様に遠心分離して、上澄み液をアルカリ抽出液に合わせた。この操作を2回繰り返した。得られたアルカリ抽出液に濃硫酸1 mLを加えてpH 1.0として100 mLに定容し、24時間静置後、420×gで5分間遠心分離し、沈殿部(腐植酸画分)と上澄み液(フルボ酸画分)に分画した。腐植酸画分は蒸留水で洗浄後、再び遠心分離して精製し、凍結乾燥した。凍結乾燥した腐植酸試料の一部を0.1 mol L⁻¹水酸化ナトリウムで溶解し、アルカリ溶解試料とした。アルカリ溶解試料は適宜希釈し、可視および紫外部の吸光度を測定した。同時に、重クロム酸カリウム硫酸混液による比色法⁹⁾により、吸光度を測定したアルカリ溶解試料の有機炭素含有量を分析した。フルボ酸画分は、ポリビニルピロリドン(PVP)を用いてPVP吸着フルボ酸画分を得た。これらの精製方法は既報^{10,11)}の方法と同様とした。また、供試したスラリーおよび堆肥からも同様に腐植酸とPVP吸着フルボ酸を抽出した。

(3) 有機・無機複合体、スラリーおよび堆肥から抽出した腐植酸の腐植化度

腐植化度の指標として、以下の式より $\Delta \log K$, RF を算出した¹²⁾。

$$\Delta \log K = \log(A_{400}/A_{600})$$

(A_{400} , A_{600} は波長400 nm, 600 nmの吸光度)

$$RF = (A_{600} \times 1,000 / (b \times 66.6))$$

(b は腐植酸溶液1 mL中の有機炭素量 (mg))

(4) 赤外線吸収 (FT-IR) スペクトル

腐植酸画分については、凍結乾燥された試料の一部を赤外線吸収スペクトル測定用臭化カリウム (KBr) と混合・粉碎し、マイクロ錠剤形成器を用いてKBr錠剤を作成した¹¹⁾。PVP吸着フルボ酸画分については、既報¹¹⁾の方法と同様にKBr錠剤を作成した。なお、KBrの混合割合は腐植酸、PVP吸着フルボ酸1 mgに対してKBr 200 mgとした。FT-IRの測定は赤外線分光光度計(日本分光製FT-IR 400型)を用いて透過法により行った。測定波数は400~4,000 cm⁻¹, 分解能4.0 cm⁻¹とした。

3. 結果および考察

1) スラリーおよび堆肥の物理性

図1にスラリーおよび堆肥に含まれる固形物の粒径組成を示した。堆肥では、>500 μmに相当するF1~F3画分の割合が最も多く、これらの粗大画分が全体の73%を占めた。また、F4からF9画分まで粒径が細くなるにしたがって固形物割合が減少する傾向を示した。このように、堆肥が主に粗粒有機物で構成されていることは、各種堆肥の物理分画試験の結果⁶⁾と一致する。スラリーでは、F1~F3の粗大画分の割合は堆肥に比べ小さく、消化液<曝気処理液<未処理液<堆肥の順であった。逆にスラリーでは<53 μmに相当する微細画分F7~F9の割合が大きく、粒径が細くなるにしたがって固形物割合が増加する傾向を示した。微細画分F7~F9の割合は、消化液76%、曝気処理液59%、未処理液43%、堆肥9%であり、発酵処理されたスラリーで高い値を示した。スラリーの微細画分割合が高いのは、サンプリングを行った酪農施設の牛舎形態がフリーストール牛舎であり、麦稈やオガクズなどの粗大有機物の混入量が極端に少ないためと考えられ

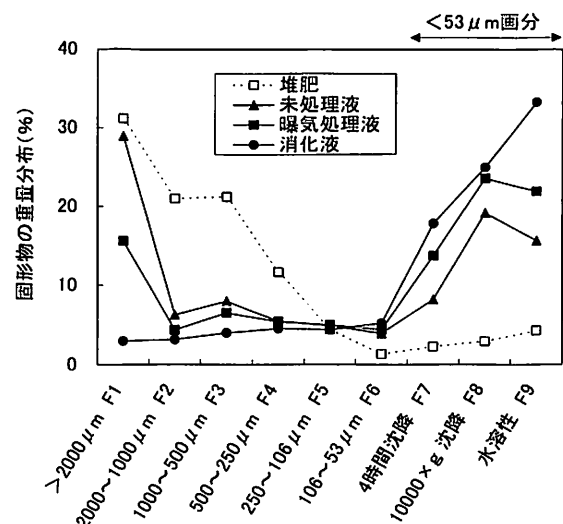


図1 スラリーに含まれる固形物の粒径組成

る。また、スラリー間で比較すると消化液および曝気処理液の微細画分割割合が未処理液に比べ高かったが、これはスラリーの発酵過程において含まれる有機物が分解され、細粒化したためと考えられる。

粘度計による流動特性試験の結果からスラリーの流動曲線を作成し、図2に示した。供試したスラリーの流動曲線は、低いズリ速度 (D) では速度の増加割合に対するズリ応力 (s) の増加割合が大きく、高いズリ速度 (D) では逆にズリ応力 (s) の増加割合が小さくなるのが特徴であった。これらの特徴は非ニュートン擬塑性流体の性質を示し、既往の試験結果⁷⁾と一致した。一般に、擬塑性流体の流動方程式⁷⁾は次式で表される。

$$s = \eta_0 D^n$$

ここで、 η_0 は流体粘稠度指数、 n は構造粘度指数である。

乳牛ふん尿スラリーでは、流動性が高いほど流体粘稠度指数 η_0 が小さく、構造粘度指数 n が大きくなる⁷⁾。本研究で供試したスラリーの η_0 は消化液 ≒ 曝気処理液 < 未処理液の順に小さく、 n は曝気処理液 ≒ 消化液 > 未処理液の順に大きかった。このことから、消化液および曝気処理液は未処理液に比べ流動性が高いと判断できる。一般に、乳牛ふん尿スラリーの嫌気発酵ではスラリーに含まれる有機物の30~40%が分解され、排出される消化液の固形物濃度が低減される¹⁰⁾。また、好気発酵では発酵の直前で加水による希釈が行われ、さらに発酵過程で有機物の分解を受けるため排出される曝気処理液の固形物濃度は低くなる¹⁰⁾。このために、両スラリーの流動性が高まったと考えられる。

図3にスラリーおよび堆肥の土壌浸透率を示した。未処理液の土壌浸透率は3時間後に23%を示し、その後増加して24時間後には52%に達した。これに対し、曝気処理液および消化液の土壌浸透率は3時間でそれぞれ50%、52%を示し、その後も増加して24時間後にはそれぞれ68%、77%に達した。一方、堆肥の土壌浸透率は6時間後まではほとんど変化せず、24時間後の浸透率は18%に過

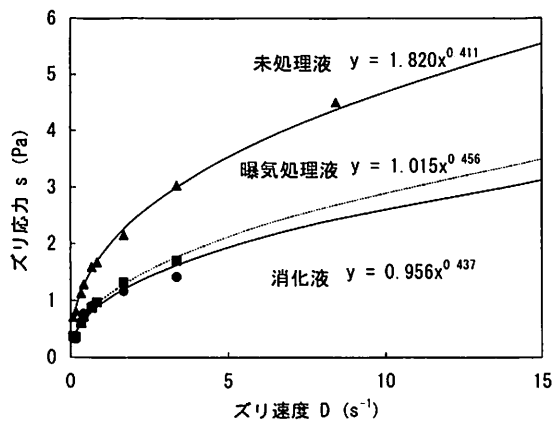


図2 スラリーの流動曲線

回歸式: $s = \eta_0 D^n$. η_0 : 流体粘稠度指数, n : 構造粘度指数.

ぎなかった。この結果から、スラリーは水分量が多く、速やかに土壌に浸透することが示された。また、スラリー間で比較すると、土壌浸透率は消化液 ≒ 曝気処理液 > 未処理液の順に高かったが、これは発酵処理されたスラリーほど水分量が多く¹⁰⁾、固形物が微細であり (図1)、しかも流動性が高い (図2) ためと考えられる。

2) マクロ団粒の有機・無機複合体から抽出した腐植酸の化学性

図4にマクロ団粒の有機・無機複合体から抽出した腐植酸の吸光曲線を示した。図中にはスラリーから抽出した腐植酸の吸光曲線も示した。有機・無機複合体から抽出した腐植酸のスペクトルは、280 nm 付近に緩やかなピークを持ち、可視部の650 nm 付近まで強い吸収を示した。これ

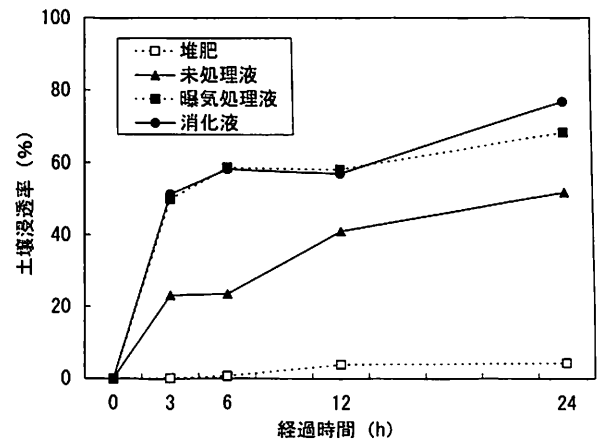


図3 スラリーの土壌浸透率

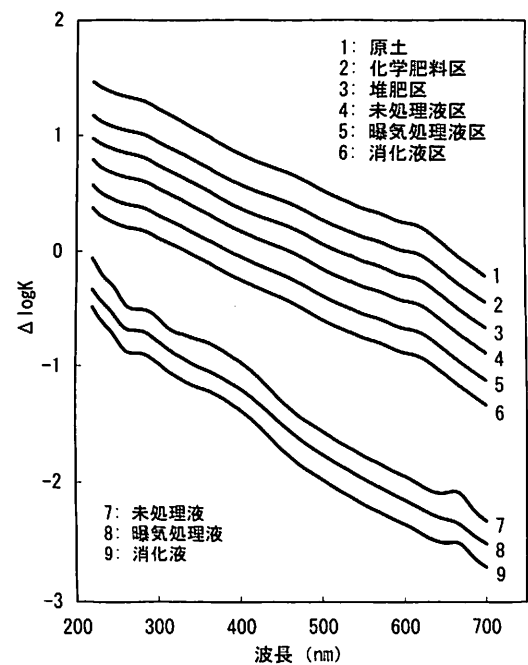


図4 マクロ団粒の有機・無機複合体から抽出した腐植酸の吸光曲線 (濃度は適宜)

1: ポット栽培に用いた原土 (< 53 μm), 2~6: ポット栽培後のマクロ団粒を構成する有機・無機複合体から抽出した腐植酸, 7~9: スラリーから直接抽出した腐植酸.

らのスペクトルはいずれも土壤の A 型腐植酸と B 型腐植酸¹²⁾ の中間的な性質を示し、試験区間で明確な差異は認められなかった。一方、スラリーから抽出した腐植酸では、280 nm 付近の肩状吸収、330~400 nm の緩やかな吸収、660 nm 付近の明瞭な吸収がみられたが、全体的に可視部での吸収が弱かった。このようなスラリー由来の腐植酸の特徴はリグニン様腐植酸¹²⁾ と類似しており、既報¹¹⁾ の結果と一致する。これらのスペクトルを比較すると、マクロ団粒を構成する有機・無機複合体中の腐植酸は、スラリー施用区にあっても土壤にもともと含まれていた高腐植化度の腐植酸が主要部分を占めていたと考えられる。他方、スラリー自体に由来する腐植酸の可視部吸収および腐植化度は、土壤固有の腐植酸と比べて非常に低かったため、有機・無機複合体中の腐植酸の吸収スペクトル形状には、施用したスラリーの影響を認識し難くなったものと考えられる。

図 5 にマクロ団粒を構成する有機・無機複合体から抽出した腐植酸の $\Delta \log K$ と RF の散布図を示した。同図にはスラリーおよび堆肥から抽出した腐植酸の結果もプロットした。ポット栽培⁵⁾ に使用した原土の $< 53 \mu\text{m}$ 画分の腐植酸は $\Delta \log K$ が 0.64, RF が 84 であり A 型に属した。一方、スラリーおよび堆肥の腐植酸は、 $\Delta \log K = 1.0 \sim 1.2$, $RF = 3.3 \sim 9.4$ であり、Rp 型に属した。 $\Delta \log K$ が低いほど、 RF が高いほど腐植化度が高いと判断されるが、これまでの知見^{11), 12)} と同様に本研究で施用したスラリーおよび堆肥の腐植酸の腐植化度も著しく低かった。

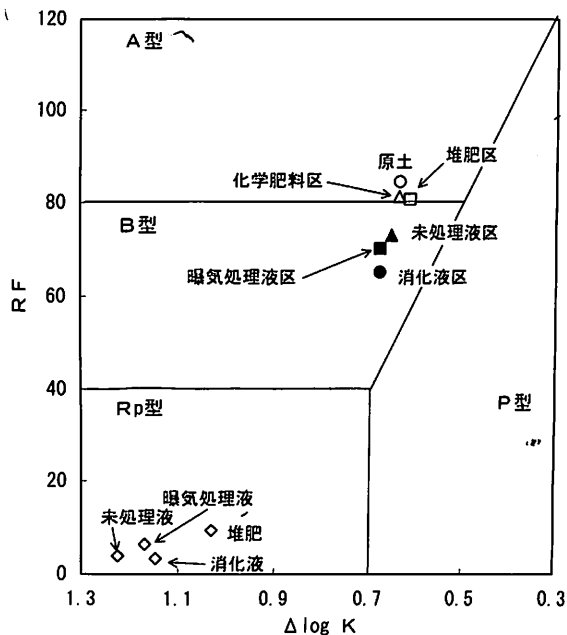


図 5 有機・無機複合体から抽出した腐植酸の $\Delta \log K$ - RF 図

原土：ポット栽培試験に用いた原土の $< 53 \mu\text{m}$ 画分から抽出した腐植酸。化学肥料区、堆肥区、未処理液区、曝気処理液区、消化液区：ポット栽培後のマクロ団粒を構成する有機・無機複合体画分から抽出した腐植酸。堆肥、未処理液、曝気処理液、消化液：堆肥あるいはスラリーから直接抽出した腐植酸。

栽培後の化学肥料区および堆肥区の腐植酸は、 $\Delta \log K$ および RF がいずれも原土と同等であり、A 型に属した。スラリーを施用した未処理液区、曝気処理液区、消化液区では、 $\Delta \log K$ は化学肥料区に比べほとんど変化しなかったが、 RF は未処理液 73, 曝気処理液 70, 消化液 65 と低下し、その結果スラリー施用区の腐植酸は B 型へと移行した。有機物連用土壌において腐植酸の性状を調べた研究¹³⁾ では、堆きゅう肥の連用により有機・無機複合体から抽出した腐植酸の腐植化度が低下することが認められている。この理由として、腐植化度の著しく低い堆きゅう肥由来の腐植酸が土壌中に集積するためであると指摘されている¹³⁾。本研究においても、スラリーの施用により可視部吸光度の低いリグニン様腐植酸が増加したために、暗色の腐植物質の割合が減少し、腐植化度が低下したと考えられる。これらの結果から、スラリーの施用により、スラリー由来の腐植酸が有機・無機複合体に集積したことがうかがえた。

図 6 にマクロ団粒の有機・無機複合体から抽出した腐植酸の FT-IR スペクトルを示した。腐植酸のスペクトルは、 $3,300 \sim 3,400 \text{ cm}^{-1}$ (水素結合した OH の伸縮振動)、 $2,930 \text{ cm}^{-1}$ (脂肪族 C-H の伸縮振動)、 $1,720 \text{ cm}^{-1}$ (カルボキシル基およびカルボニル基の C=O 伸縮振動)、 $1,650 \text{ cm}^{-1}$ (芳香族 C=C, カルボキシレート, 水素結合した C=O の伸縮振動)、 $1,230 \text{ cm}^{-1}$ (カルボキシル基の C-O 伸縮および OH 変角振動)、 $1,030 \text{ cm}^{-1}$ (多糖類の C-O 伸縮振動) であった。これらのピークの帰属は、Stevenson の FT-IR スペクトル分析概念¹⁴⁾ および既報¹¹⁾ に従った。試験区間で比較すると、原土、化学肥料区および堆肥区は同様のスペクトルを示し、 $2,930 \text{ cm}^{-1}$ のピークは他の試験区より弱く、 $1,720$ と $1,650 \text{ cm}^{-1}$ の吸収強度が強かった。この特徴は土壤の A 型および B 型腐植酸¹²⁾ の中間的な性質を示し、可視・紫外部の吸光曲線の結果と同様の傾向を示した。一方、スラリーを施用した未処理液区、曝気処理液区および消化液区における腐植酸は、原土、化学肥料区および堆肥区に比べ $2,930$, $1,650$, $1,030 \text{ cm}^{-1}$ のピークが強くなっており、土壤の B 型腐植酸¹²⁾ と同様のスペクトルを示した。このように、スラリーを施用することによって、有機・無機複合体を形成する腐植酸の脂肪族成分、芳香族およびカルボキシレート成分、多糖類成分が増加していることが明らかになった。著者らは、既報においてこれらの成分がスラリーから抽出した腐植酸の主要成分であることを報告している¹¹⁾。したがって、スラリー由来の腐植酸が土壤粒子と結合して有機・無機複合体に集積し、マクロ団粒の形成に貢献したと考えられた。

図 6 にマクロ団粒の有機・無機複合体から抽出した PVP 吸着フルボ酸の FT-IR スペクトルを示した。ピークの帰属は前述と同様とした。PVP 吸着フルボ酸の主要ピークは、 $3,300 \sim 3,400 \text{ cm}^{-1}$, $1,720 \text{ cm}^{-1}$, $1,630 \text{ cm}^{-1}$ (芳香族 C=C, カルボキシレート, 水素結合した C=O の伸縮振動)、 $1,400 \text{ cm}^{-1}$ (フェノール性水酸基の C=O

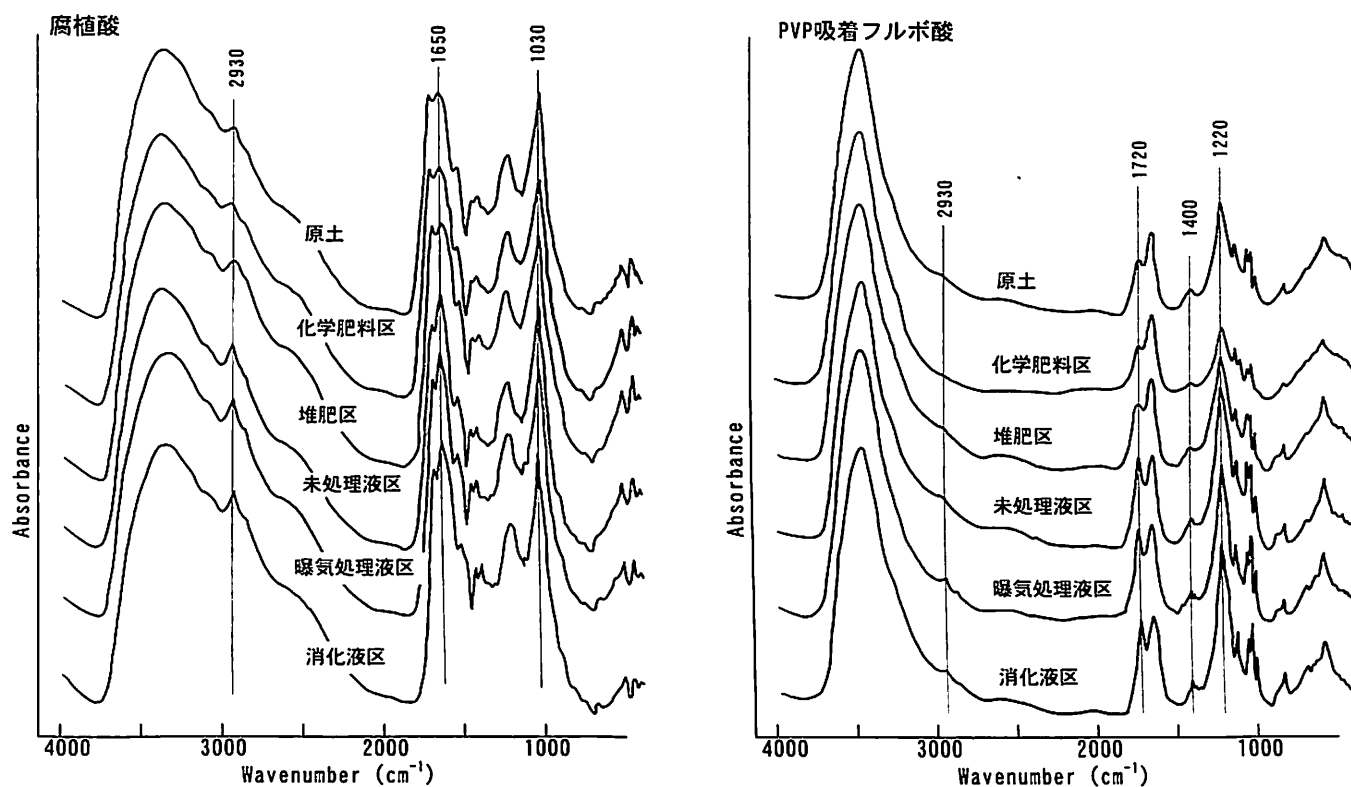


図6 マクロ団粒の有機・無機複合体から抽出した腐植酸およびPVP吸着フルボ酸のFT-IRスペクトル

伸縮，メチル基およびメチレン基のC-H変角振動)， $1,220\text{ cm}^{-1}$ （カルボキシル基のC-O伸縮およびOH変角振動）において認められた。試験区間でピーク強度を比較すると，原土，化学肥料区および堆肥区の間では明瞭な差異はみられなかった。しかし，スラリーを施用した未処理液区，曝気処理液区および消化液区においては $1,720$ ， $1,400$ ， $1,220\text{ cm}^{-1}$ のピークが原土，化学肥料区および堆肥区に比べ強くなっていた。すなわち，スラリーの施用によって，有機・無機複合体のカルボキシル基およびカルボニル基成分，フェノール基成分が増加することが示された。これまでに著者らが行ったスラリー中の腐植物質のFT-IR分析¹¹⁾によると，スラリーから抽出したPVP吸着フルボ酸のスペクトルにおける主要ピークはカルボキシル基およびカルボニル基成分，フェノール基成分である。これらのことから，スラリー由来のフルボ酸も腐植酸と同様にマクロ団粒の有機・無機複合体の集積に関与していることが推定された。

3) 乳牛ふん尿スラリー施用による土壌団粒形成メカニズム

前報⁵⁾では，乳牛ふん尿スラリーに含まれる腐植物質組成およびスラリーの物理性がマクロ団粒に影響を及ぼしていることを推定した。ここでは前報⁵⁾および本研究の結果を総合し，乳牛ふん尿スラリー施用による土壌団粒メカニズムについて，堆きゅう肥と比較しながらより詳細に検討を加える。一般に，マクロ団粒の形成においては有機物，糸状菌菌糸，作物根が重要な役割を担っている^{3,15-17)}。Tisdall and Oades³⁾が示したマクロ団粒の形成モデルで

は，微生物バイオマス，生成された微生物代謝産物および腐植物質が $2\text{ }\mu\text{m}$ 以下の土壌粒子と反応して $2\sim 20\text{ }\mu\text{m}$ の粒子（有機・無機複合体）を形成するとされている（図7）。 $2\sim 20\text{ }\mu\text{m}$ の粒子は作物根および糸状菌菌糸によって結合し，直径 $20\sim 250\text{ }\mu\text{m}$ のマイクロ団粒を形成する。このように形成されたマイクロ団粒は，さらに作物根，糸状菌菌糸，微生物代謝産物などによって結合し，直径 $250\text{ }\mu\text{m}$ 以上のマクロ団粒を形成する。

堆きゅう肥施用土壌¹³⁾では，堆きゅう肥の連用により粗粒有機物画分が増加し，有機・無機複合体画分の有機物は逆に減少する傾向にある。また，堆きゅう肥由来の腐植酸は，腐植化度が低くかつ高分子であり，その多くが粗粒有機物画分へ集積する¹³⁾。さらに，土壌に集積した粗粒有機物画分が微生物分解を受けると，微生物バイオマスが増加し，微生物代謝産物と腐植物質が生成されると推定されている⁴⁾。Aoyamaら⁴⁾は，堆きゅう肥が土壌に施用されると粗粒有機物画分が徐々に分解され，微生物バイオマス，微生物代謝産物および腐植物質を生成し，これらの物質が有機・無機複合体の形成に貢献するだけでなく，マイクロ団粒を結びつけて団粒の安定性を高め，マクロ団粒の形成を促進すると推定している（図7）。

一方，前報⁵⁾で検討した乳牛ふん尿スラリー施用試験では，スラリーの施用によりマクロ団粒の有機物が増加し，マクロ団粒の形成が促進された。これらの試験区において，マクロ団粒を形成した有機物は主に有機・無機複合体で集積しており⁵⁾，堆きゅう肥施用の場合と異なった。本研究の結果から，有機・無機複合体にはスラリー由来の腐

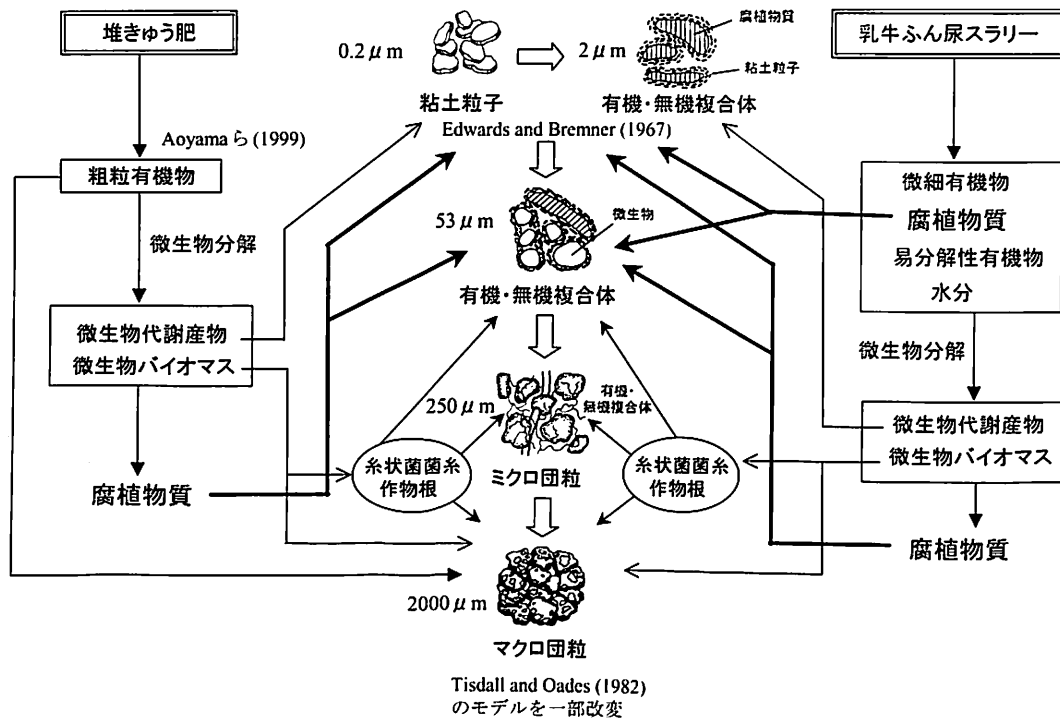


図 7 乳牛ふん尿スラリー施用による団粒形成メカニズム

植物質が集積することが推定された。スラリーの有機物分析結果⁵⁾によると、スラリーの腐植物質割合は堆肥に比べ著しく高かった。また、スラリーおよび堆肥の土壤浸透性試験の結果(図3)から、スラリーは堆肥に比べ、土壤浸透が速やかに進むことが明らかとなった。そのために、スラリーに含まれる腐植物質が土壤粒子と速やかに反応し、有機・無機複合体をより多く形成させたと考えられる(図7)。また、スラリーの物理性試験の結果から、スラリーは堆肥に比べ微細な有機物で構成されていること(図1)が明らかとなった。特に、53 μm以下の微細画分の割合が高く、水溶性有機物画分が全体の15~35%を占めた。微細な有機物は粗粒有機物よりも微生物分解を受けやすく¹⁸⁾、そのために、より多くの微生物バイオマス、微生物代謝産物および腐植物質が生成されたと考えられる。これらの物質も有機・無機複合体およびマクロ団粒の形成に影響を及ぼしたと推定される。前報⁵⁾のスラリーの施用試験では、スラリー施用区の糸状菌数および作物根は堆肥区に比べ増加していたが、これらもマクロ団粒の形成を促進させた要因の一つであろう(図7)。

マクロ団粒の形成量を施用したスラリーの種類で比較すると、消化液>曝気処理液>未処理液の順であり、発酵処理されたスラリーほど高い値を示した⁵⁾。有機物分析、物理性試験結果から、消化液および曝気処理液では未処理液に比べ固形物が微細であり(図1)、腐植物質割合が高かった⁵⁾。また両スラリーは流動性が高いために速やかに土壤に浸透された。さらに、両スラリー区は未処理液区に比べ、糸状菌菌糸および作物根量が多かった⁵⁾。これらの傾向は消化液>曝気処理液>未処理液の順であり、マクロ団粒の形成量と対応していた⁵⁾。したがって、消化液およ

び曝気処理液は未処理液に比べ、有機・無機複合体を凝集させ、マイクロ団粒を形成しやすく、そのためにマイクロ団粒の集合体であるマクロ団粒の形成量が多かったと考えられる。

Dinelら¹⁹⁾は、植壤土に有機物組成の異なる泥炭土を添加したところ、腐植物質に富み脂肪族成分の割合が高い有機物を加えた場合には土壤団粒の形成が促進され、かつ団粒の安定度が高まることを報告している。Chaney and Swift²⁰⁾は、土壤から抽出した腐植酸を土壤に再添加して団粒の形成量を調べたところ、団粒形成が促進されその安定度が高まったことを認め、さらに腐植酸と糖類を併用するとその安定度はさらに高まることを示した。Fortunら^{21,22)}が行った腐植物質の添加試験では、堆きゅう肥から抽出した腐植酸を砂壤土に添加することにより団粒が形成され、腐植酸とフルボ酸を併用した場合には団粒の安定度がより高まったことが報告されている。さらに、腐植物質の団粒形成効果は堆きゅう肥自体を多量に加えた場合よりも高かったことが示されている²¹⁾。これらの研究において、団粒の形成が促進される要因として、添加した腐植物質がカルボキシル基やフェノール性水酸基に富むこと²¹⁾、腐植物質と土壤粒子との結合が容易になること^{19~21)}などが挙げられている。また、家畜ふん尿を施用した場合、糖類のような易分解性有機物が併存する場合には微生物バイオマスが増加して微生物代謝産物が生成される²⁰⁾ため、団粒の形成がより促進されると推測される。本研究で対象としたスラリーは堆肥に比べ腐植物質割合が高く⁵⁾、含まれる腐植酸およびフルボ酸はカルボキシル基やフェノール性水酸基に富み¹¹⁾、しかも糖類などの易分解性有機物も含む¹⁰⁾。そのために、乳牛ふん尿スラリー施用土壤では有

機・無機複合体の形成が促進され、微生物およびその代謝産物によりマクロ団粒が増加し、その結果土壌理化学性が改善されたと考える。また、その効果は発酵が進んだスラリーほど高いことを示した⁵⁾。すなわち、本研究の結果から乳牛ふん尿スラリーは、堆きゅう肥と同様に土壌改良資材として有効であることが示された。今後は、実際の圃場において、乳牛ふん尿スラリーの継続施用が土壌理化学性に及ぼす影響について明らかにする必要がある。

4. 要 約

細粒質褐色低地土を充填したポット土壌に発酵過程の異なる3種スラリー（消化液、曝気処理液、未処理液）を施用し、化学肥料区、堆肥区と土壌団粒組成を比較した。その結果、スラリー施用によりマクロ団粒の形成が増加し、その量は消化液区>曝気処理液区>未処理液区>堆肥区≒化学肥料区の順であった。また、マクロ団粒を粒径分画したところ、スラリー施用区では有機・無機複合体（<53 μm）に有機物が集積し、それに伴いマクロ団粒（>250 μm）の形成量が増加したことが推測された。本研究では、ポット試験に施用したスラリーの固形粒の粒径分画試験、粘性特性試験、土壌浸透試験を実施し、その物理的特徴を明らかにした。また、スラリー施用土壌において、マクロ団粒を構成する有機・無機複合体から腐植物質を抽出し、その化学的特徴から腐植物質の由来を推定した。さらに、これらの結果から、乳牛ふん尿スラリー施用による団粒形成メカニズムを考察した。スラリーに含まれる固形物は、>500 μmの粗大画分が少なく、逆に<53 μmの微細画分の割合が高かった。微細画分の割合は、消化液>曝気処理液>未処理液>堆肥の順に高かった。また、スラリーの流動性および土壌への浸透率は、消化液≒曝気処理液>未処理液の順に高かった。マクロ団粒を構成する有機・無機複合体から抽出した腐植酸は、原土（<53 μm）、化学肥料区および堆肥区でA型を示した。一方、スラリーおよび堆肥から抽出した腐植酸は、いずれもRp型を示した。さらに、消化液区、曝気処理液区および未処理液区はB型を示し、化学肥料区に比べ、腐植酸の腐植化度が低下していた。これらの有機・無機複合体から抽出した腐植酸およびPVP吸着フルボ酸のFT-IRスペクトルから、スラリー施用区では有機・無機複合体にスラリー由来の未熟な腐植酸が集積していることが推定された。以上の結果から、乳牛ふん尿スラリーの施用により、スラリー中の腐植物質と土壌粒子が結合して有機・無機複合体の形成を促進させ、その結果マクロ団粒が多く形成されたと推定された。また、マクロ団粒の形成はスラリーの物理性に影響を受け、発酵処理されたスラリーほどマクロ団粒の形成量が多くなることを明らかにした。したがって、乳牛ふん尿スラリーは、堆きゅう肥と同様に土壌改良資材として有効であることが示された。

謝 辞 本研究を行うにあたり、帯広畜産大学 近藤鍊三教授、山形大学 粕淵辰昭教授、弘前大学 青山正和教授

に貴重なご助言を賜りました。ここに記して感謝の意を表します。

文 献

- 1) Bronick, C. J. and Lal, R.: Soil structure and management: a review. *Geoderma*, **124**, 3~22 (2005)
- 2) 山根一郎: 9. 土壌の構造と水, 土壌学の基礎と応用, p. 81~85, 農文協, 東京 (1967)
- 3) Tisdall, J. M. and Oades, J. M.: Organic matter and water-stable aggregates in soils. *J. Soil Sci.*, **33**, 141~163 (1982)
- 4) Aoyama, M., Angers, D. A. and N'Dayegamiye, A.: Particulate and mineral-associated organic matter in water-stable aggregates as affected by mineral fertilizer and manure applications. *Can. J. Soil Sci.*, **79**, 295~302 (1999)
- 5) 保井聖一・筒木 潔・明石憲宗・木村義彰: 乳牛ふん尿スラリーの施用が土壌団粒形成および理化学性に及ぼす影響, 土肥誌, **76**, 269~276 (2005)
- 6) 青山正和・柴田三香・熊田恭一: 物理分画した数種の堆肥の性状とコンポストの腐熟過程の解析, 同上, **53**, 337~343 (1982)
- 7) 中村和正・宮崎健次・門間 修: 牛ふん尿スラリーの管路輸送に関する基礎的実験, 開発土木研究所月報, **532**, 12~20 (1997)
- 8) 土壌物理性測定法委員会編: 土壌3相 (第1章), 土壌物理性測定法, p. 42~47, 養賢堂, 東京 (1976)
- 9) 立川 涼: 土壌および液体試料中の有機物の迅速定量ならびに糖類に関する二, 三の定量法, 土肥誌, **37**, 28~33 (1966)
- 10) 保井聖一・筒木 潔・明石憲宗・木村義彰: 乳牛ふん尿消化液に含まれる有機物の化学的特徴—曝気処理液および未処理液との比較—, 同上, **75**, 321~327 (2004)
- 11) 保井聖一・筒木 潔・明石憲宗・木村義彰: 乳牛ふん尿消化液から抽出した腐植酸およびフルボ酸の化学的特徴, 同上, **75**, 347~354 (2004)
- 12) 熊田恭一: 土壌有機物の化学, 第2版, 304 pp, 学会出版センター, 東京 (1981)
- 13) Aoyama, M. and Kumakura, N.: Quantitative and qualitative changes of organic matter in an Ando soil induced by mineral fertilizer and cattle manure applications for 20 years. *Soil Sci. Plant Nutr.*, **47**, 241~252 (2001)
- 14) Stevenson, F. J.: Humus Chemistry, 2nd ed., 495 pp., John Wiley & Sons, Inc., New York (1994)
- 15) Piccolo, A., Pietramellara, G. and Mbagwu, J. S. C.: Use of humic substances as soil conditioners to increase aggregate stability. *Geoderma*, **75**, 267~277 (1997)
- 16) Edwards, A. P. and Bremner, J. M.: Microaggregates in soils. *J. Soil Sci.*, **18**, 64~73 (1967)
- 17) Czarnes, S., Hallett, P. D., Bengough, A. G. and Young, I. M.: Root- and microbial-derived mucilages affect soil structure and water transport. *Eur. J. Soil Sci.*, **51**, 435~443 (2000)
- 18) Aoyama, M.: Properties of fine and water-soluble fractions of several composts. I. Micromorphology, elemental composition and nitrogen mineralization of fractions. *Soil Sci. Plant Nutr.*, **31**, 189~198 (1985)
- 19) Diné, H., Mehuys, G. R. and Levesque, M.: Influence of humic and fibric materials on the aggregation and aggregate stability of a lacustrine silty clay. *Soil Sci.*

- 151, 146~158 (1991)
- 20) Chaney, K. and Swift, R. S.: Studies on aggregate stability. II. The effect of humic substances on the stability of re-formed soil aggregates. *J. Soil Sci.*, **37**, 337~343 (1986)
- 21) Fortun, A., Fortun, C. and Ortega, C.: Effect of farm-yard manure and its humic fractions on the aggregate stability of a sandy-loam soil. *ibid.*, **40**, 293~298 (1989)
- 22) Fortun, A., Benayas, J. and Fortun, C.: The effects of fulvic and humic acids on soil aggregation: a micromorphological study. *ibid.*, **41**, 563~572 (1990)

**Mechanism of Soil Aggregate Formation by the Application of Cow Manure Slurry
—Effect of the Physical Properties and Humic Composition of Cow Manure Slurry on the Formation of
Mineral-Associated Organic Matter—**

Seiichi Yasui, Kiyoshi Tsutsuki, Norimune Akashi* and Yoshiaki Kimura
(*Obihiro Univ. Agric. Vet. Med., Zukosha Co. Ltd., **Hokkaido Pref. Cent. Agric. Exp. Stn.*)

Three types of cow manure slurry (anaerobically digested slurry, aerated slurry, and untreated slurry) were applied to fine textured brown lowland soil packed in Wagner pots and aggregate composition of the soil was compared with plots amended with chemical fertilizers and compost. Due to the application of slurry, formation of macro-aggregate was enhanced, and their amounts increased in the order of the plots treated with digested slurry > aerated slurry > untreated slurry > compost = chemical fertilizers. When macro-aggregate was disaggregated, organic matter was accumulated in the mineral-associated organic matter fraction (<53 μm) and the formation of macro-aggregate (>250 μm) was enhanced in the slurry-treated plots. In this paper, the slurries used in the pot experiment were fractionated according to particle sizes, and viscosimetric characteristics and soil permeability were examined to clarify the physical characteristics of slurries. In addition, humic substances were extracted from the mineral-associated organic matter fraction of macro-aggregates in the soil amended with slurry. From the chemical characteristics, the origin of humic substance in the mineral-associated organic matter fraction was estimated, and the mechanism of soil aggregate formation due to the application of cow manure slurry was estimated. Solid fractions contained in slurries were low in the coarse fraction (>500 μm) while high in the fine fraction (<53 μm). The proportions of fine fractions were larger in the order of digested slurry > aerated slurry > untreated slurry > compost. The fluidity of the slurries and permeability into soil were larger in the order of digested slurry = aerated slurry > untreated slurry. Humic acids extracted from mineral-associated organic matter fraction of macro-aggregates belonged to type A in the plots amended with chemical fertilizers and compost as well as in the original soil (<53 μm). On the other hand, the humic acids extracted from slurries and compost belonged to type Rp. Furthermore, humic acids from the mineral-associated organic matter fraction in the macro-aggregates of the soils amended with digested slurry, aerated slurry and untreated slurry all belonged to type B, indicating the decrease in the degree of humification compared with the plots amended with chemical fertilizers and compost. It was estimated from the FT-IR spectra of humic acids and PVP-adsorbed fulvic acids extracted from mineral-associated organic matter fraction that humic acids with low degree of humification were accumulated in the mineral-associated organic matter fraction of slurry-applied soil. From the above results, it may be concluded that the formation of mineral-associated organic matter was enhanced by the binding of soil particles and humic substances in slurries, which led to the further formation of macro-aggregates. It was also clarified that the formation of macro-aggregate was influenced by the physical properties of slurry, and the fermented slurries were more effective in the formation of macro-aggregates. Therefore, it became clear that cow manure slurry functions effectively as soil improving material like compost and farm yard manure.

Key words cow manure slurry, physical characteristics of slurry, mineral-associated organic matter, humic substances, aggregate formation mechanism

(Jpn. J. Soil Sci. Plant Nutr., **76**, 277-284, 2005)

水田二毛作体系のダイズ作後コムギの窒素吸収に対するダイズ残渣の影響*

原 嘉隆**・土屋一成**・草佳那子**

キーワード ダイズ, コムギ, 作物残渣, 窒素有機化, 水田二毛作

1. はじめに

今日、米の生産調整とダイズの自給率向上を目的とし、水田でイネの代わりにダイズを栽培する場合が増えていく。イネとコムギを主とした水田二毛作体系で隔年または数年おきにダイズを作付けする場合、ダイズ作後は窒素供給が増えるので、後作のコムギ作では倒伏を回避するために窒素施肥量を慣行よりも減らす必要がある¹⁻³⁾。ダイズ作後のコムギ作における大まかな窒素施肥量は地域ごとまたは栽培条件ごとに施肥試験¹⁻³⁾から求められているが、ダイズ作後の窒素供給増加の要因が明確には分かっていないため、圃場ごとの適切な窒素施肥量の推定が難しい。

適切な窒素施肥量の推定には、一般に土壤分析によって跡地土壤からの窒素供給量を把握することが有効と考えられる。ただし、二毛作ではダイズ残渣がコムギ播種直前まで地上に残り、土壤分析は粗大物を除いた土壤を対象とするので、粗大物であるダイズ残渣の影響は土壤分析で把握できない。このため、跡地土壤からの窒素供給量とは別にダイズ残渣からの窒素供給量を把握する必要がある。

残渣からの窒素供給量を把握するには、残渣を土壤と培養したときの窒素無機化量や後作の窒素吸収量を調べる方法が考えられる。前者では、ダイズ葉柄に含まれる窒素の20%が無機化したという報告⁴⁾があるが、残渣の分解で無機態窒素が一時的に減少する窒素の有機化が起きるため、窒素無機化量からコムギ作期間の窒素供給量を推定することは難しい。後者では、重窒素を利用することによりダイズ残渣に含まれる窒素の15%が後作牧草に吸収されたと推定した報告⁵⁾があるが、有機物の分解のように窒素の有機化と無機化が頻繁に起きる場合、重窒素が普通の窒素と置換される機会が増えるので、重窒素の回収割合は標識された有機物の影響を反映しにくいことが指摘されている⁶⁾。したがって、ダイズ作後コムギ作の窒素供給量に対するダイズ残渣の影響は、跡地土壤の影響と区別されて十分把握されていないと考えられる。

そこで、本試験では、ダイズ作後コムギ作の窒素供給におけるダイズ残渣の影響を跡地土壤の影響と区別して把握するために、前作の違いとは別にダイズ残渣の有無による後作コムギの窒素吸収量を比較した。また、ダイズ残渣が圃場の窒素供給に影響を与える要因を把握するために、ダイズ残渣を圃場に堆積する落葉と収穫時にばらまかれる茎葉に分けて、それぞれの分解特性や含まれる窒素の無機化特性を調べた。さらに、ダイズ残渣の影響と区別して圃場の窒素供給における跡地土壤の影響を調べるため、ダイズ作前後における土壤の可給態窒素量の変化を調査した。

2. 試験方法

1) 前作とダイズ残渣がコムギの窒素吸収量に与える影響

(1) 圃場試験

福岡県筑後市の隣接する2つの圃場(細粒灰色低地土)において、前作としてダイズ(*Glycine max* (L.) Merrill, 品種: サチユタカ, 条間80 cm×株間20 cm, 2002/7/16播種~11/18収穫)とイネ(*Oryza sativa* L., 品種: ふくいずみ, 条間30 cm×株間20 cm, 2002/6/25移植~10/10収穫)を作付けした。ダイズ作後には、落葉と収穫残渣の茎葉を鋤込んだ残渣有区とこれらを排除した残渣無区を設けた。なお、ダイズ残渣の量は落葉が乾物重220 g m⁻²程度、収穫残渣の茎葉が前年の同様な圃場の調査結果から230 g m⁻²程度と推定された。また、イネ作後は稲藁を排除した残渣無区とした。これらの試験区に後作としてコムギ(*Triticum aestivum* L., 品種: イワイノダイチ, 条間25 cm, 播種量: 8 g m⁻², 2002/11/29播種~2003/5/28収穫)を無施肥で栽培した。各試験区において2.5 m²ずつ3カ所でコムギの地上部を刈り取った。この窒素含有率をNCアナライザー(住化分析センター, NC-900)で測定し、地上部窒素量を窒素吸収量とした。

コムギの畝間から1カ月ごとに深さ10 cmで各区3カ所ずつ土壤を採取した。湿土(5 mm未満)を100 g L⁻¹ KClで抽出し、デバルダ合金を用いた水蒸気蒸留法により、乾土(105°C乾燥)当たりの無機態窒素量を求めた。

なお、「有意」は危険率5%以下で有意であることを示し、比較に関する記述は平均値の差を対象とした。

(2) ポット試験

2002年に同一風乾土(細粒灰色低地土, 8.3 kg)をポット(0.05 m²)に詰めて、ダイズ作(品種: サチユタ

* 本報告の一部は日本土壤肥料学会 2004年福岡大会において発表した。

** (独) 農業・生物系特定産業技術研究機構 九州沖縄農業研究センター 水田作研究部 (833-0041 筑後市和泉 496)

E-mail: yshara@affrc.go.jp

2004年10月12日受付・2004年12月16日受理

日本土壤肥料学雑誌 第76巻 第3号 p.285~291 (2005)