

# 土壌動物の生態と土壌物理

中村 好男\*

## Ecology of Soil Animals and Soil Physics

Yoshio NAKAMURA\*

Department of Upland Farming, Tohoku National Agricultural Experiment Station

### 1. はじめに

次の事象における土壌の物理性に、土壌動物の関与はどの程度なのか、が関心のあるところである。第一は、耕地での耕起の意義、また作物根の伸長と土壌の硬度と脆さや空隙への関与。たとえば、畑土壌の改善目標としての硬度は、山中式硬度計の値で22 mm以下とされる(鬼鞍 豊(編)(1985))。ところが現在試験している無耕起畑ではこの値近くを示すことがあるが、ダイズや麦は順調に育っているように見受けられる。第二は、土壌の物理学と動物学の知識が意識的に活用された汚水処理技術、新見式土壌浄化法における不飽和流動の成立条件への関与、である。

#### 1. 土壌動物は多種多様な動物の集合体～土壌物理性とは土壌環境形成動物群が関連

土壌中には多種多様な土壌動物と称される動物が生息し、土壌微生物とともに土壌圏(八幡, 1989)の土壌生物を構成する。多数の動物門からなる土壌動物は、食性、棲み場所あるいは大きさ等から分けられ扱われる(表-1)。

土壌動物の多くの群は種類相や、その生態がまだ未解明であり、機能の全容は明らかでない。これまでの知見に基づいて、筆者は現在のところ土壌の3性質への関わり度の強さから次の2群に分けている(中村, 1991):

- ┌ 主に土壌の物理・化学性に影響を与える群(土壌環境形成動物群)～例: ミミズ・シロアリ
- └ 主に土壌の生物性に影響を与える群(土壌生物調節動物群)～例: トビムシ・ヒメミミズ

ミミズ(小型類のヒメミミズを含める)は他の動物に比べ知見が集積し、土壌の3性質全てとの強い関わりが明らかにされつつある。すなわちミミズは土壌圏の担い

手(中村, 1998a; 海外ではEcosystem engineer: Jones *et al.*, 1994, Lavelle *et al.*, 1997)として、土壌の性質(物理・化学・生物的特質)を変化させ、資源の有効性を高めることを通じて、直接・間接的に土壌圏の3大機能、生産・分解・調整(自浄)に関与し(中村, 1998b), 生態系の物質循環に寄与すると考えられる。

#### 2. 土壌動物の存在(生息)可能な条件(土→動物)としての土壌物理性

土を棲み場とする動物(表-1)は、土中に空隙を作り、あるいは作られた空隙を生活空間とする。そのため土壌の物理的性質のうち、空隙を作る動物の生息に対しては、堅さや粒径組成の度合い、また形成された空隙を利用する動物の生息に対しては、生活空間としての空隙の大きさやその中の酸素濃度、および移動媒体と生命維持としての水の質と量などが、強い制限要素として働くことと推定される。また水分と温度条件の変動と幅も重要であろう。図-1に空隙の間隔( $\Phi$ ), 水分状態(pF, 相対湿度, 空隙内状態)および主要動物の推定される関連を示した。

pFを尺度とすると、土壌動物の多様性の高いところは、1.8(重力水)以下の不飽和条件の範囲と考えられる。すなわち土壌動物の棲み場として、空隙内に酸素とともに水が存在することでその水を利用する水性動物の生息を可能にし、また高い湿度が保たれることで湿性動物の生息を可能にする。

#### 3. ミミズ(土壌動物の代表として)の存在は土壌物理性に影響を及ぼすか

土壌動物の土壌の性質への影響は、野外での測定とともに、実験的に目的とする土壌動物を添加(人工移入)した人工生態系(マイクロコスモ)で解析される。筆者は<土+土壌微生物>, <土+土壌動物>, <土+土壌微生物+土壌動物>, それぞれの組み合わせは異なる循環

\* 農林水産省東北農業試験場 〒960-2156 福島県荒井字原宿南50  
 キーワード: 土壌動物, ミミズ, 土壌物理

表-1 多様な土壌動物の仕分け  
Table 1 Groups of soil animals

動物分類学	食性	棲み場所	体の大きさ	
原生動物門	節足動物門	落葉食 捕食	枯葉生息群	大型群
扁形	脊椎	材 糞	腐植	中型 (湿性)
袋形		根 寄生	土 (乾性)	中型 (乾性)
軟体		腐植	土 (湿性)	小型
環形		セン苔	土 (水性)	微小型
緩歩		菌	生物 (寄生)	

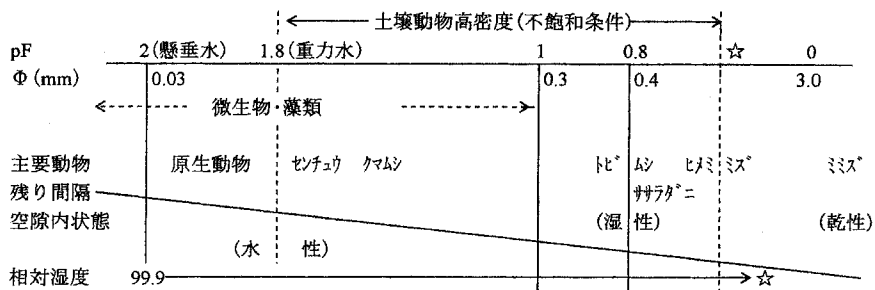


図-1 土壌動物の生息域と空隙および水分状態との関連推定図 (☆: 数値不明)

Fig. 1 Effects of the soil pores and water contents on soil animals.

表-2 大麦収穫後の土壌表面硬度 (板倉 1990 より抜粋改変)

Table 2 Soil hardness in soil surface after the harvest of barley

処理条件	化成肥料のみ	無肥料	枯葉のみ	枯葉+ミミズ2	枯葉+ミミズ4	枯葉+ミミズ8
硬度計値	16.5	23.0	23.5	8.5	7.5	8.5

系が生じ、潜在能力や新能力があらわれる、と仮定している。ただしこれらの組み合わせのうち、土壌微生物を除去した<土+土壌動物>を、人工的に創出することは極めて難しく(土壌動物そのものの生存が微生物と密接に関連することもある)、土壌動物の影響は、ほかの2組の結果の差から解析されることが多い。また添加する土から、あらかじめ微生物や動物を取り除くのに、熱、乾燥あるいは薬品処理されるが、はたしてこうした処理を受けた土が、本来の土と同じなのか疑問が残るところである。以下に、これまでに筆者らの実験から得た物理性に関する結果の概要を示した。

3-1. 土壌圏活用型農法をミミズは支えるか

A: 風乾土(腐植質黒ボク土)を詰めたポット(1/2,000 a)に、ミミズ(ヒトツモンミミズ)を移入(2, 4あるいは8成熟個体)し、温室内にて大麦を栽培した。ミミズ

移入ポットの大麦収穫後の土壌表面や横断面には、ミミズの通過孔と思われる5ミリ程の孔が多数見られ、ミミズ無移入に比べ硬度が低下した(表-2)。

B: 野外枠(コンクリート枠、無底、3.3m×3.3m、腐植質黒ボク土及び淡色黒ボク土)にミミズ(ヒトツモンミミズ; 100成熟個体)を移入し、夏作にダイズ、冬作にオオムギを栽培した。移入4年後(ダイズ収穫後)の三相分布は、2土壌型ともミミズ移入枠で気相が多かった(表-3)。ミミズ移入枠の10年後の土壌表層には、多数のミミズ糞が見られた。11年後から上壤水を採取し、水量とその中の窒素量を計測している。ただしこの実験にはミミズ無移入の無耕起・被覆処理が含まれないので、数値がミミズ移入効果そのものを示していない。

C: ミミズを移入しない野外枠(コンクリート枠、無底、3.3m×3.3m、褐色森林上、灰色低地土及び腐植質黒ボク

表-3 ミミズ移入4年後のグイズ収穫跡土壤の三相分布 (中村・未発表)

Table 3 Soil air, liquid and solid contents after the introduction of earthworms, *Pheretima hilgendorfi*

処理条件	深さ (cm)	腐植質黒ボク土			淡色黒ボク土		
		固相 (%)	液相 (%)	気相 (%)	固相 (%)	液相 (%)	気相 (%)
ミミズ移入 (無耕起・被覆)	0-5	36.5	48.2	15.3	35.1	47.3	17.6
	5-10	36.1	47.1	16.8	33.1	52.7	14.2
	10-15	40.0	54.7	5.3	42.0	50.9	7.1
ミミズ無移入 (耕起・無被覆)	0-5	40.3	45.6	14.1	38.3	49.2	12.5
	5-10	39.7	50.4	9.9	38.2	51.1	10.7
	10-15	39.4	58.8	1.8	38.1	57.4	4.5

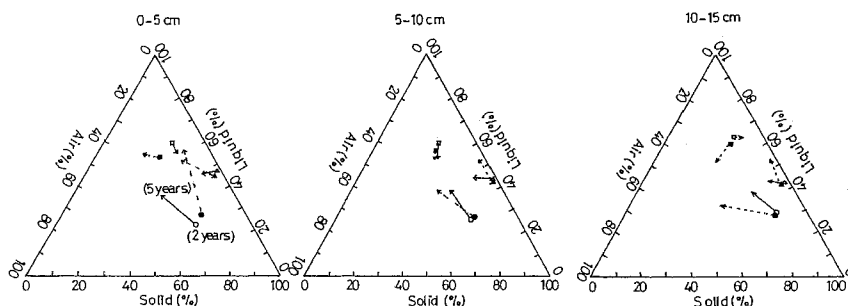


図-2 肥料形態と耕起有無が三相分布に与える効果 (板倉ら, 1994 の表 2 を図化) 棒試験; 初回調査処理2年目, 二回5年目  
化成肥料・耕起: ○褐色森林土, △灰色低地土, □火山灰土; 実線  
有機肥料・無耕起: ●褐色森林土, ▲灰色低地土, ■火山灰土; 点線

Fig. 2 Effects of fertilizers and tillage on soil air, liquid and solid contents

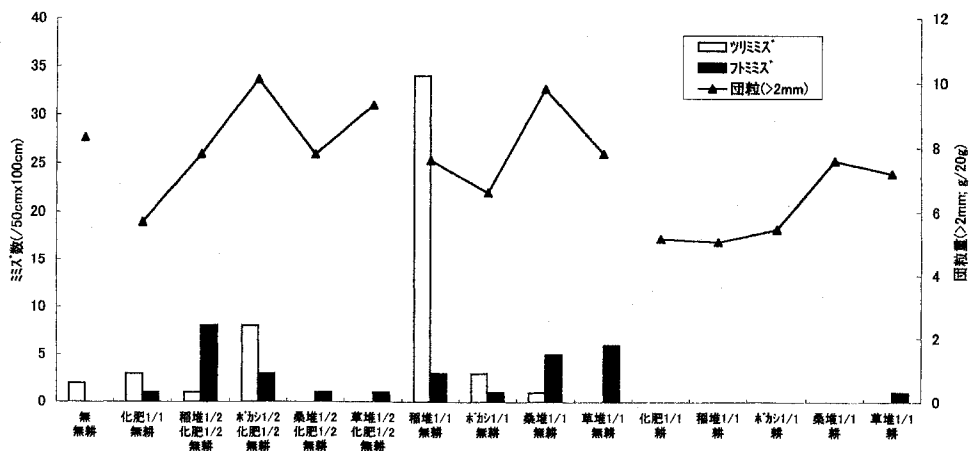


図-3 肥料形態と耕起有無がミミズ数と団粒量に与える効果 (黒ボク土; 処理7年目; 中村・未発表)

Fig. 3 Effects of fertilizers and tillage on earthworm numbers and soil aggregates.

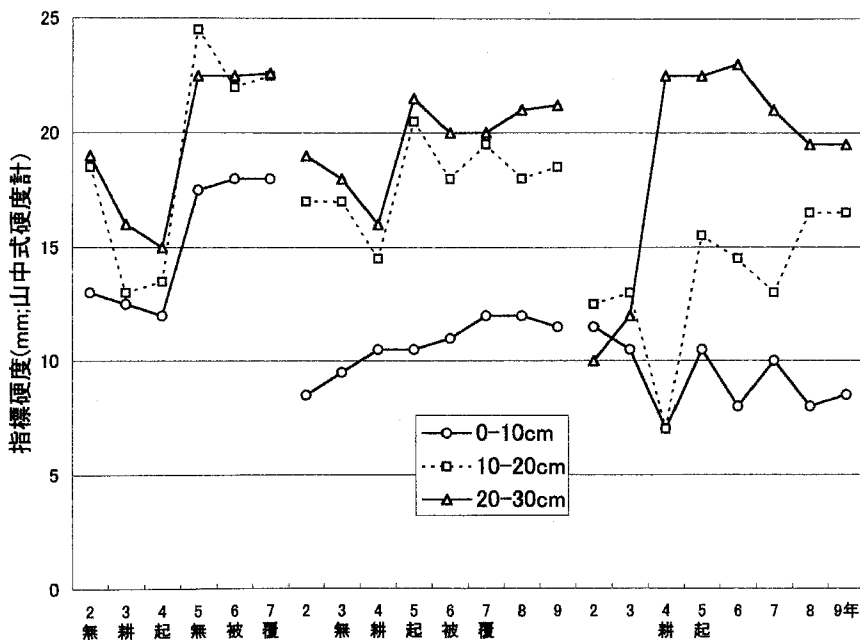


図-4 耕起，無耕起（無被覆）および無耕起（被覆）処理された畑土壌の硬度の推移（中村・未発表）

Fig. 4 Effects of tillage and mulch on soil hardness.

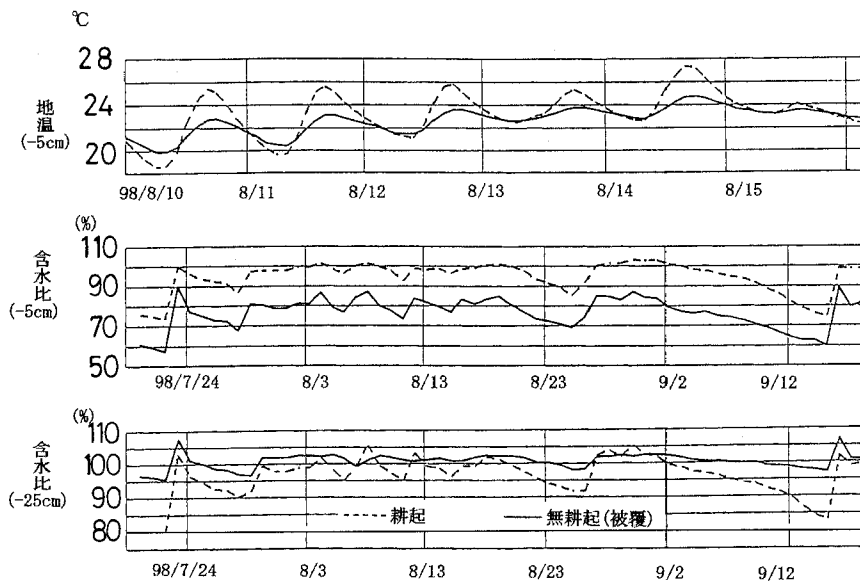


図-5 耕起の有無が土壌水分（含水比）と地温に与える効果（中井ら・未発表）

Fig. 5 Effect of tillage on soil water content and soil temperature.

土)に、肥料形態と耕起有無を組み合わせた処理区を設け、ミニトマト・ダイズなどを栽培した。5年目のミミズ数と団粒量 (>2mm) が正の相関 (r=0.85) を示し

(Enami *et al.*, 1999), 三相分布 (図-2) の液相率は褐色森林土でやや多く、気相率は灰色低地上で多かつた (板倉ら, 1994)。

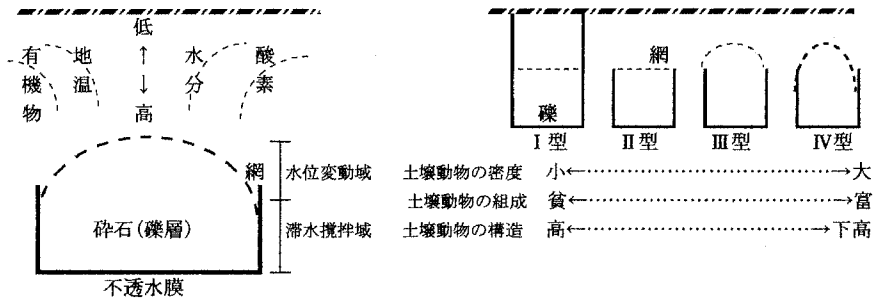


図-6 新見式汚水処理装置のトレンチとその付近の土壤条件 (左: 中村 1983 を一部変更) および側壁と網の位置と形状による類別と土壤動物の関連 (右: 中村 1996 を一部変更)  
 Fig. 6 Soil conditions in the Niimi trench (left) and the relationship between the trench type and soil animals (right).

D: ミミズを移入しない野外枠 (枠無し, 14.7 m<sup>2</sup>, 腐植質黒ボク土) に, 肥料形態と耕起の有無から 15 処理区を設け, インゲン・ミニトマトなど野菜を栽培した。図-3のごとく, 5 年目では枯草堆肥 (図-3 の枯堆) を除く, 化成肥料 (化肥), 稲藁堆肥 (稲堆), ポカシおよび桑条堆肥 (桑堆) のいずれも耕起条件でミミズは生息していなかった。ミミズ数と団粒量 (>2 mm) とは相関 (正) が低かった (r=0.4)。

E: 圃場 (淡色黒ボク土) に, 耕起 (春と秋の 2 回), 無耕起 (無被覆) および無耕起 (被覆) の 3 処理区を設けた。なお無耕起 (被覆) 区は, 土壤動物の多様性を高める方策として提案された二重被覆 (中村, 1999) が, 適宜刈り取った雑草と作物残さを材料として用いられた。処理開始 2 年後からの土壤硬度の推移 (図-4) によると, 0-5 cm 層は耕起区と無耕起 (被覆) 区の間には大きな差異が無く, 無耕起 (無被覆) 区が 5 年後から堅くなった。その下の 2 層は 3 処理区間に大きな差異があった。10 年後の無耕起 (被覆) 区の土壤断面は, 表層に腐植集積による黒色化が深さ約 4 cm まで進んでいた。夏季における表層 (深さ 5 cm) の土壤温度の日変動は, 無耕起 (被覆) 区で少なく, また降雨後の表層の土壤水分は, 無耕起 (被覆) 区が速やかに乾燥した。しかし下層 (深さ 25 cm) では, 無耕起 (被覆) 区の方が水分変動は少なく乾燥も遅かった (図-5)。

3-2. 新見式汚水処理装置のヒメミミズ数は不飽和流動と関連か

新見式汚水処理装置の構造はいたって簡易である (図-6 左)。汚水浄化の原理を, 古くから用いられてきた”地獄だめ”と称せられる縦穴浸透方式と比較すると, 次の 2 点の大きな差異がある (毛管浄化研究会, 1983)。第一に縦穴式では, 汚水の土壤への浸透が穴の底部付近から始まり, 垂直下方又は斜め下方に向かう。こ

れに対し, 新見式では汚水はいったん不透水膜内の礫層に集まり, その後土壤への浸透は土壤の比較的浅い位置から始まり, しかも流動の方向が上方に仕向けられ, 土粒子表面及び粒子間隙に生息する土壤生物 (小動物と微生物) の活動の盛んな表層部を通して流れるようにしてあること。第二に水の流動が縦穴式では飽和浸透であるのに対し, 新見式は不飽和流動で, ゆっくり水を移動させる。そのことにより不透水膜の内側 (トレンチ) やその上方は図-6 (左) のような条件が作られる。しかしながら, 各地に設置された装置は図-6 (右) のごとく側壁と網の位置と形状から 4 型に類別され, その土壤動物の密度, 組成および分布構造には一定の傾向が認められた。

新見式汚水処理装置の汚水浄化の高い効率が維持されるには, 毛管水流動が遅滞なく起こることであり, 土壤動物は毛管水流動の条件づくりに寄与すると推測されている (中村, 1996)。両者の関連を, 汚水流入開始から明らかにするために, 黒ボク土に処理装置を設置した。設置開始から 20 ケ月間の礫層内の水位変動 (図-6 の水位変動域) の記録によると, 16 ケ月から変動幅が小さくなり, 閉塞状況を示した。この閉塞が発生した頃から, ヒメミミズ数が減少し始めた (Nakamura, 1984)。しかしながらこの結果からは, 閉塞が先か, ミミズ減少が先か判断できなかった。

4. ミミズの存在と物理性をどう結びつけるか

上述の実験や多くの類似文献から, ミミズの存在する土壤は, 地温, 空気酸素拡散, あるいは水分・pF は上昇し, 硬度は低下する。この変化とミミズの存在はどのような関連があるのか? 比較的最近の生理・生態に関する文献 (例えば Pedobiologia, 43 (6), 1999 には第 6 回ミミズ生態学国際シンポジウムの多数の報告あり) をもとに関連を探ってみる。

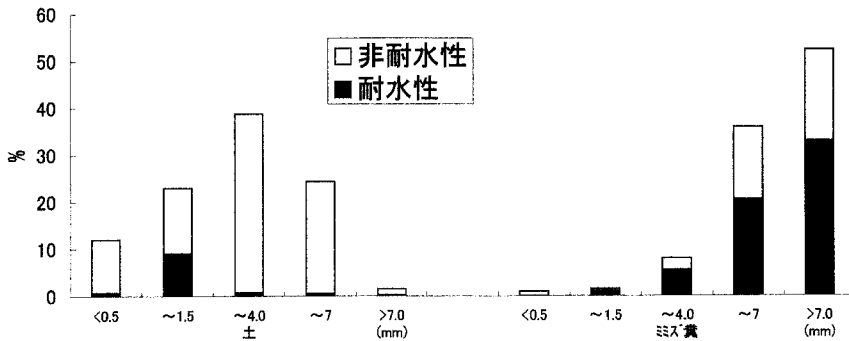


図-7 ヒトツモンミズ糞と周囲土の粒径割合および粒径別耐水性附粒割合 (中村・板倉・未発表)

Fig. 7 Soil particles and waterproof aggregates of wormcasts and soils (Right: cast of *Pheretima hilgendorfi*; black: waterproof aggregates).

ミズの体の仕組みには次の特徴が認められている;

#### 強靱な筋肉

例: バライロツリミズは軸方向に平均 72.8 kPa (McKenzie & Dexter, 1988 a); 放射方向に 230 kPa (McKenzie & Dexter, 1988 b)

#### 食欲な食性と強固な腸

例: 排便量は体重の 5 倍/日 (Lavelle, 1978), 砂糞と蠕動活動 (Laverack, 1963)

#### 多様な腸内(微)生物

例: 細菌, 放線菌, 糸状菌, 原生動物, センチュウ (Satchell, 1967)

#### 腸内の強力な活性物質

例: セルラーゼ, プロテアーゼ, キチナーゼなど多様 (Laverack, 1963, Merino-Trigo *et al.*, 1999)

こうした体の特徴をもつミズの行動は, <食べる・徘徊・排フン・分泌・死>の5つがあり, このうち土壌物理性とは, 主に<食べる・徘徊・排フン>が関与すると推測される。

#### 4-2. 腐植形成と層位の乱れ(かきませ)と落葉層消失

ミズの間断ない食べる・徘徊の行動は, 腐植を形成し, 層位を乱れさせる。とくに森林で顕著にあらわれ, 例えば, アメリカ・ミネソタ州の火山灰土壌からなるカバヤボラの広葉樹林では, 林内に捨てられた釣り餌のミズが殖え, わずか 10 年ほどで腐植型がモダーからムルと変化した (Alban & Berry, 1994)。また草地では, ミズによる根群層の破壊が, 物質循環に寄与し, 草生産量を増加させる (Lee, 1985)。

#### 4-3. 孔道 (Burrow)

徘徊行動によって地中に孔道が形成される。孔道は,

住み家(多くは地表面に開口)と移動探索の通路に使われる。孔道の作り方は 2 通りあり, 第一は強靱な筋肉を用いて土壌を押し開いて作る, そのため孔道の周囲に亀裂がはいる。第二は口から液を出し, 土を柔らかくし呑み込み通過させてつくる。

孔道の内壁は, 3 層(腐植層, 石灰層, 酸化鉄層)構造を持つ (Jeanson, 1964)。厚さ 1-2 mm の内壁には粘液が付着し  $\text{NO}_3$  に富み, そのため細菌が繁殖し窒素の循環に寄与 (Parkin & Berry, 1999) したり, 孔道は植物の根やトビムシも利用する。孔道の内径は 1-10 ミリ, ときには 30 ミリ (Lec & Foster, 1991), 深さは地下 80 cm (Lighthart & Peek, 1997) にもなる。孔の数はミズ密度に影響され,  $100-300/\text{m}^2$  の報告が多い。体積は 1.3-9 L および長さは  $142-888 \text{ m}/\text{m}^2$  に達する (Kretzschmer, 1978, 1982)。

野外の孔道の観察保存は, 表面から少しずつはぎ取り作図したり (Lighthart *et al.*, 1993), 採土器具で試料を取り樹脂で固める (箱石・私信)。孔道の形成過程は, X 線 (Jégou *et al.*, 1998), CT-スキャン (Joschko *et al.*, 1989), 二次元画像解析 (Kretzschmer & Aries, 1992), 軟 X 線 (Narioka & Nijima, 1995) などで行われる。このうち軟 X 線は観察対象のミズを殺傷しないこと, 費用が廉価の利点がある。

孔道の解析は, ガス, 水および溶質の移動通路としての機能から取り組まれ, すでに大気と土壌間の酸素拡散モデル (Rappoldt, 1993) が提案されている。この孔道は耕起によって簡単に壊れる。そのため孔道の機能の解析は, 耕起されない草地や無耕起畑で行われることが多い。例えば草地ではミズが生息すると粗孔隙が 1.5-4 倍増加する (Tisdall, 1985)。無耕起畑では, 雨の浸透量

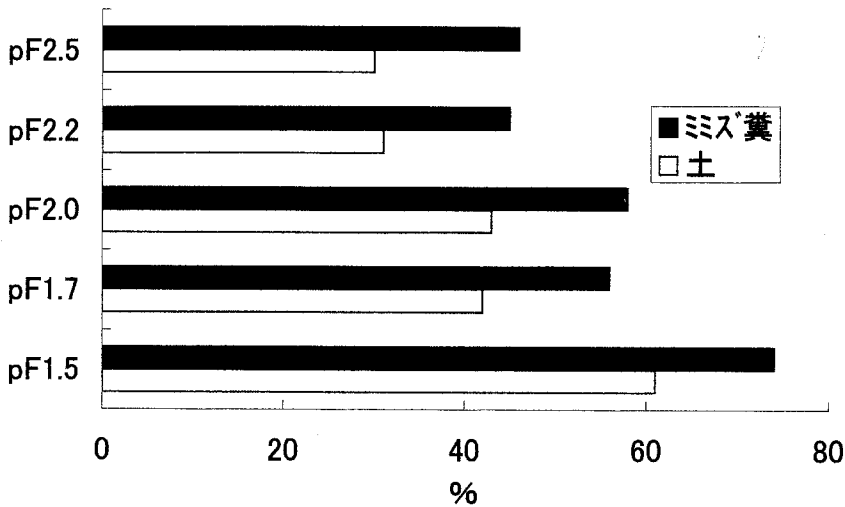


図-8 ヒトツモンミミズ糞と周囲土の pF 別の保水率 (含水比; 中村・板倉・未発表)

Fig. 8 Water contents at different pF values of wormcasts and soils (Black : cast of *Pheretima hilgendorfi*)

がミミズが生息しないと  $1.11 \text{ L/m}^2$  ( $0.02 \text{ mm/min}$ ) に対し、ミミズが生息すると  $6.5 \text{ L/m}^2$  ( $0.12 \text{ mm/min}$ ) に上昇する (Ehler, 1975)。無耕起のコーン畑の測定によると平均して降雨量の 3.9% がミミズ孔を通過し (Edwards *et al.*, 1990)、降雨実験では地表流去水が 2 時間に 60 mm の降雨では、孔道があると約半分に減少する (Roth & Joschko, 1991)。当然ながら、土壤流亡も減少する (Pitkänen & Nuutinen, 1998)。

#### 4-4. フン (Cast)

地表に排出されるミミズ糞は、重なって固まる事が多く、数センチの大きな塊にもなる。糞に対する関心は古くから高く、排出量の計測が世界各地でなされている。量はミミズ密度に影響され、2-250 t/ha/yr ほどである。南アフリカには、高さ 30 cm-1 m、径 1 m のドーナツ状にミミズ糞が排出される (Ljungstrom & Reinecke, 1969)。しかしながらミミズ糞の大半は地中に排出される。例えばサバンナでは地表の 2.5 t/ha/year に対し、地中に 1,200 t が排出される (Lavelle, 1978)。

芝地の表層から採取したフトミミズ糞は、粒径 7 mm 以上が 50% 以上、4 mm 以上では 80% 以上を占めていた (図-7)。糞は粘土、シルト、砂など一次粒子とともに、植物繊維の破片が含まれる (有村・岩下, 1987)。

ミミズ糞の物理性はエサの内容に大きく影響される (Flegel *et al.*, 1998)。一般的にミミズ糞の保水性は高く (図-8)、その断面には、多数の空隙が見られ、水中に浸

けると多数の泡が出てくる。空隙は大小さまざまで、水中に浸けても不飽和状態が保持される。そのミミズ糞が地表とともに地下の孔道を埋め、雨水の浸透、土壤と大気とのガス交換などに寄与する (Blanchart *et al.*, 1993)。粗孔隙の 90% 以上が水没し、根の生長に悪条件となっても、ミミズ孔道は空気を含むことができる (Kretzschmar, 1978)。

排泄された直後の糞は、土壤団粒よりも安定性は低いが、乾燥とともにしだいに安定性が高まる。羊のひずめを仮定した 80 kPa で圧縮したところ、土壤団粒は 55% に圧縮されるが、ミミズ糞は 66% にとどまった (McKenzie & Dexter, 1987)。構造の安定性の増加は、腸通過中に添加された菌由来の物質 (?) が糊として作用し堅くなり、その糊の産生は細菌の繁殖し易い有機物の存在によって促進されると推測されている (Marinissen & Dexter, 1990; Marinissen *et al.*, 1996)。またミミズ体内の石灰腺から分泌される石灰と、呑み込まれた有機物とが結合した物質が安定性を高める (Swaby, 1950)。エサとしての土の有機炭素含量が高いと安定性が高く (Guggenberger *et al.*, 1996)、また粘土量 (測定範囲 15-55%) や  $\text{CaCO}_3$  量 (測定範囲 0.3-3.2%) が高くなるにつれて団粒量は減少するが、強度は増す (Schrader & Zhang, 1997)。Al, Fe, Ca, Mg (Gu & Doner, 1993) や溶解性の炭水化物も安定性の増加に寄与する (Hindell *et al.*, 1997)。

水中につるしたミミズ糞は 3 ヶ月経過しても崩れな

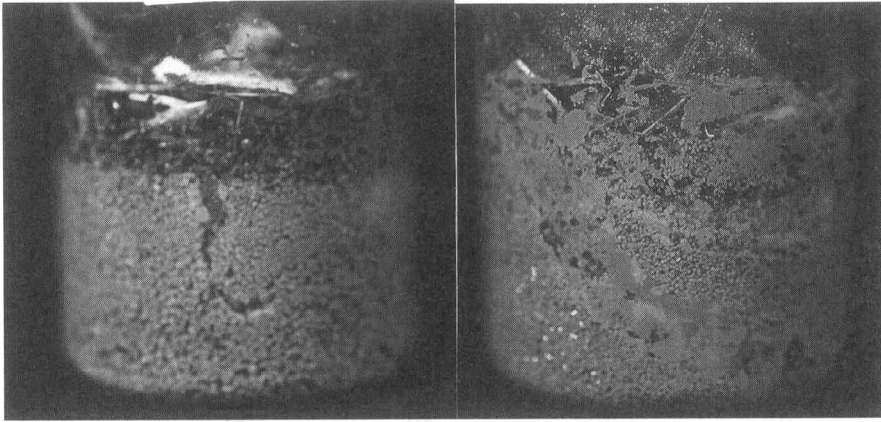


図-9 ミクロコスモ実験例 (左: シマミズ移入 100 日後, 右: ヒトツモンミズ移入 8 日後)

Fig. 9 Introduction of earthworms in microcosm (Left: *Eisenia fetida*, right: *Pheretima hilgendorfi*).

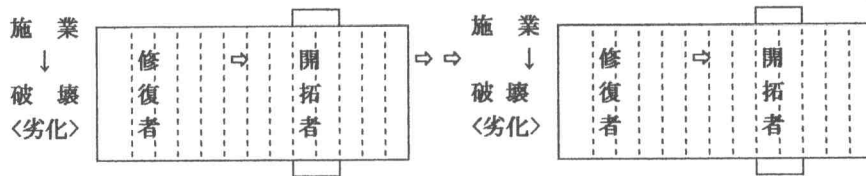


図-10 農作業による土壌物理性の破壊とミミズ活動による修復

Fig. 10 Destruction of soil physical properties by agricultural practices and restoration by earthworms.

かった。野外の温度や水分が変動し、植物根や多様な生物が存在する条件ではどのくらい保持されるのであろうか。サバンナでの測定では、 $>2\text{mm}$  の団粒が 2-5 cm 深さで約 65% を占め、ミミズを排除しても、その割合は 6 ヶ月間変化が無く、12 ヶ月後においても 50% であった (Blanchaet & Spain, 1989; Lee & Foster, 1991)。

耕地土壌には、土壌物理性の改良を目的に多様な資材が投入される。かつてミミズ糞は、1970-80 年のミミズ養殖ブーム時代に、土壌改良資材として販売されたが、安定性が持続しないなどの理由から、改良資材としての価値が疑問視された (伊達, 1979)。しかしミミズ糞の安定性が長期に維持され、またその安定性はミミズのエサの内容に影響されることが明らかにされつつある。ミミズの種類やエサの内容からの検討、さらに、堆肥の効用とされる土壌の団粒化促進効果が、ミミズ糞にも有るのかどうかの検討が待たれる。

なおミミズ糞とミミズコンポスト (vermicompost) は別物で、前者は地表に排出された糞を集めたもの、あるいはミミズを用いたミミズコンポストから糞を選別し

たものである (中村, 1999)。ミミズコンポストと微生物主体 (好氣的発酵) の堆肥との物理性の大きな差異は、前者の方が粒径が大きく多孔質構造が安定性であることである (Haimi & Huhta, 1987)。

##### 5. ミミズの生態型と実験目的に合う種類の選択

ミクロコスモ法にはミミズ、ヤスデ、トビムシなど多様な土壌動物が移入され、扱いが容易な種類もしだいに明らかになってきた。当然ながら移入する動物 (あるいは種類) は実験の目的から選択され、誤った選択はとんでもない結果を生じることもある。例えばミミズの地表有機物を地下 (土壌) へ移動する効果を実験するとする。図-9 (左) のごとくシマミズを移入すると、有機物の土壌への移動はほとんど無く、結論としてミミズの地表有機物の地下移動能力はほとんど無いとなる。ところが、図-9 (右) のごとくフトミズを移入すると、わずかな日数で地表有機物の大半が地下へ移動させられる。シマミズは堆肥生息型 (中村, 1999) で堆肥に多く見られ、入手あるいは飼育が容易であるためか、しばしば実験に用いられるが、土壌に生息することはまれであ



る。土壤との関連の実験には、土壤生息型の種類（例えばフトミミズ属ヒトツモンミミズ）が適当と考えられた。ミミズと土壤物理性に関連する報告が、多数発表される今日では、当然ながら用いたミミズの種類名は記載される。残念なことに我が国における、ミミズの土壤の性質に与える効果を実験した先駆的報告（小野寺・武田, 1935）には種名の記載が無い。まことに残念である。

## 6. おわりに

耕地土壤は多様な資材の投入、農作業あるいは作物生長などにより、恒常的に攪乱され、土壤物理性の諸性質の多くは破壊を免れない。一方、その土壤に生息するミミズの5大行動には、その破壊を修復する行動が含まれる（図-10）。今後、耕作による土壤物理性の劣化の定量と、ミミズの修復力の定量が、同じ場面で実験され論議されることを希望したい。

## 引用文献

- Alban, D.H. & Berry, E.C. (1994) : Effects of earthworm invasion on morphology, carbon and nitrogen of a forest soil. *Appl. Soil Ecol.*, **1** : 243~249.
- 有村玄洋・岩下 徹 (1987) : 稲わら分解におけるミミズ類の有無による土壤呼吸量および2, 3の化学性の差異. 宮崎総農試報. **21** : 37~48.
- Blanchart, E. & Spain, A.V. (1989) : Rôle des vers de terre dans l'élaboration et la conservation de la structure des sols de savane. In 'Processus Biologique et Fertilité de Sol dans les Savannes Humides de Côte d'Ivoire' (ed. O. Lavelle) pp. 26~41. (Ministere de l'Environnement SRETIE : Paris.) (Lee & Foster 1991 より)
- Blanchart, E., Bruard, A. & Lavelle, P. (1993) : The physical structure of casts of *Millsonia anomala* (Oligochaeta : Megascolecidae) in shrub savanna soils (Cote d'Ivoire). *Geoderma*, **56** : 119~132.
- 伊達 昇 (1979) : ミミズ糞肥料は本当に効くかーミミズブームの副産物, 現代農業, 1979年10月号: 64~65.
- Dexter, A.R. (1978) : Tunneling in soil by earthworms. *Soil Biol. Biochem.* **10** : 447~449.
- Edwards, W.M., Shipitalo, M.J., Owens, L.B. & Norton, L.D. (1990) : Effect of *Lumbricus terrestris* L. burrows on hydrology of continuous no-till cornfields. *Geoderma*, **46** : 73~84.
- Ehlers, W. (1975) : Observations on earthworm channels and infiltration on tilled and untilled loess soil. *Soil Sci.*, **119** : 242~249.
- Enami, Y., Shiraishi, H. & Nakamura, Y. (1999) : Use of soil animals as bioindicators of various kinds of soil management in northern Japan. *JARQ*, **33** : 85~89.
- Flegel, M., Schrader, S. & Zhang, H. (1998) : Influence of food quality on the physical and chemical properties of detritivorous earthworm casts. *Appl. Soil Ecol.*, **9** : 263~269.
- Gu, B. & Doner, H.E. (1993) : Dispersion and aggregation of soils as influenced by organic and inorganic polymers. *Soil Sci. Soc. Amer. J.*, **57** : 709~716.
- Guggenberger, G., Thomas, R.J. & Zech, W. (1996) : Soil organic matter within earthworm casts of an anecic- and endogenic tropical pasture community, Columbia. *Appl. Soil Ecol.*, **3** : 263~274.
- Haimi, J. & Huhta, V. (1987) : Comparison of composts produced from identical wastes by "vermistabilization" and conventional composting. *Pedobiologia*, **30** : 137~144.
- Hindell, R.P., McKenzie, B.M. & Tisdall, J.M. (1997) : Influence of drying and ageing on the stabilization of earthworm (*Lumbricidae*) casts. *Biol. Fertil. Soils*, **25** : 27~35.
- 板倉寿三郎 (1990) : フトミミズが大麥の生育と成分及び土壤条件に与える効果. 東北農業研究, **43** : 117~118.
- 板倉寿三郎・白石啓義・中村好男 (1994) : 無耕起被覆処理が畑土壤の理化学性並びに動物相に及ぼす影響. 東北農業研究, **47** : 169~170.
- Jeanson, C. (1964) : Micromorphologie et pédozoologie expérimentale, contribution à l'étude sur plaques minces de grandes dimensions d'un sol artificiel structure par les *Lumbricidae*, In 'Soil Micromorphology' (ed. Jongerius,) pp. 47~55. 2nd Int. Working Meeting Soil Micromorph., Arnhem.
- Jégou, D., Cluzeau, D., Wolf, H.J., Gandon, Y. & Trehen, P. (1998) : Assessment of the burrow system of *Lumbricus terrestris*, *Aporrectodea giardi*, and *Aporrectodea caliginosa* using X-ray computed tomography. *Biol. Fertil. Soils*, **26** : 116~121.
- Jones, C.G., Lawton, J.H. & Schachak, M. (1994) : Organisms as ecosystem engineers. *Oikos*, **69** : 373

~386.

- Joschko, M., Diestel, H. & Larink, O. (1989) : Assessment of earthworm burrowing efficiency in compacted soil with a combination of morphological and soil physical measurements. *Biol. Fertil. Soils*, **8** : 191~196.
- Joschko, M., Muller, P.C., Kotzke, K., Dohring, W. & Larink, O. (1993) : Earthworm burrow system development assessed by means of X-ray computed tomography. *Geoderma*, **56** : 209~221.
- Kretzschmer, A. (1978) : Quantification ecologique des galeries de lombriciens. Technique et premieres estimations. *Pedobiologia*, **18** : 31~38.
- Kretzschmar, A. (1982) : Description des galeries de vers de terre et variations saisonnieres des reseaux (observations en conditions naturelles). *Rev. Ecol. Biol. Sol*, **19** : 579~591.
- Kretzschmer, A. & Aries, F. (1992) : An analysis of the structure of the burrow system of the giant gippsland earthworm *Megascolides australis* McCoy, 1878 using 3d-images. *Soil Biol. Biochem.*, **24** : 1583~1586.
- Lavelle, P. (1978) : Les vers de terre de la savane de Lampto (Côte d'Ivoire). Peuplements, populations et fonctions de l'écosystème. *Publ. Lab. Zool. E.N.S.*, **12** : 1~301.
- Lavelle, P., Bignell, D., Lepage, M., Wolters, V., Roger, P., Ineson, P., Heal, O.W. & Dhillon, S. (1997) : Soil function in a changing world : the role of invertebrate ecosystem engineers. *Eur. J. Soil Biol.*, **33** (4) : 59~193.
- Laverack, M.S. (1963) : The physiology of earthworms. Pergamon Press, 206 pp. London.
- Lee, K.E. (1985) : Earthworms : their ecology and relationships with soils and land use. p. 411. Academic Press, Sydney.
- Lee, K.E. & Foster, R.C. (1991) : Soil fauna and soil structure. *Aust. J. Soil Res.*, **29** : 745~775.
- Lighthart, T.N., Peek, G.J.W.C. & Taber, E.J. (1993) : A method for the three-dimensional mapping of earthworm burrow systems. *Geoderma*, **57** : 129~141.
- Lighthart, T.N. & Peek, G.J.W.C. (1997) : Evolution of earthworm burrow systems after inoculation of lumbricid earthworms in a pasture in the Netherlands. *Soil Biol. Biochem.*, **29** : 453~462.
- Ljungstrom, P.O. & Reinecke, A.J. (1969) : Ecology and natural history of the microchaetid earthworms of South Africa. 4. *Pedobiologia*, **9** : 152~157.
- Marinissen, J.C.Y. & Dexter, A.R. (1990) : Mechanisms of stabilization of earthworm casts and artificial casts. *Biol. Fertil. Soils*, **9** : 163~167.
- Marinissen, J.C.Y., (1996) : Clay dispersability in moist earthworm casts of different soils. *Appl. Soil Ecol.*, **4** : 83~92.
- McKenzie, B.M. & Dexter, A.R. (1987) : Physical properties of casts of the earthworm *Aporrectodes rosea*. *Biol. Fertil. Soil*, **5** : 152~157.
- McKenzie, B. & Dexter, A.R. (1988a) : Axial pressures generated by the earthworm *Aporrectodea rosea*. *Biol. Fertil. Soils*, **5** : 323~327.
- McKenzie, B.M. & Dexter, A.R. (1988b) : Radial pressures generated by the earthworm *Aporrectodea rosea*. *Biol. Fertil. Soils*, **5** : 328~332.
- Merino-Trigo, A., Sampedro, L., Rodriguez-Berrocal, F.J., Mato, S. & Cadena, M.P. (1999) : Activity and partial characterisation of xylanolytic enzymes in the earthworm *Eisenia andrei* fed on organic wastes. *Soil Biol. Biochem.*, **31** : 1735~1740.
- 毛管浄化研究会 (編) (1983) : 土壌圏の科学~土壌浄化法の基礎, P352, 土壌浄化センター, 東京.
- 中村好男 (1991) : 土壌生態系活用型農業とそれを支える土壌動物. 東北農業研究, (別号) **4** : 43~59.
- 中村好男 (1983) : 汚水処理と土壌動物. *Edaphologia*, **28** : 33~35.
- Nakamura, Y. (1984) : Aspects of colonization by *Enchytraeus albidus* (Enchytraeidae) and *Sinella curviseta* (Collembola) in Niimi waste water treatment trench. *Pedobiologia*, **26** : 381~386.
- 中村好男 (1991) : 土壌生態系活用型農業とそれを支える土壌動物. 東北農業研究, (別号) **4** : 43~59.
- 中村好男 (1996) : 新見式土壌浄化技術を支える土壌生物. 月刊生活排水, **184** : 8~17.
- 中村好男 (1998a) : 土壌小動物の生態研究を通して知る環境保全. 東北農業研究, (別号) **11** : 1~10.
- 中村好男 (1998b) : 土壌動物と作物根の土壌環境~ミミズの活用. 農業および園芸, **73** (1) : 165~170.
- 中村好男 (1999) : ミミズと土と有機農業 (2版), P123, 創森社, 東京.
- Narioka, H. & Nijima, K. (1995) : A new method of estimating burrowing activity of soil animals by

- soft X-ray images. p. 80~90, in Structure and function of soil communities (eds. Edwards *et al.*), Kyoto Univ. Press.
- 鬼鞍 豊編 (1985) : 土壤・水質・農業資材の保全, P 316, 博友社, 東京.
- 小野寺伊勢之助・武田成太郎 (1935) : ミミズの林木苗木成長に及ぼす影響. 土肥誌, **9** : 30~32.
- Parkin, T.B. & Berry, E.C. (1999) : Microbial nitrogen transformations in earthworm burrows. Soil Biol. Biochem., **31** : 1765~1771.
- Pitkänen, J. & Nuutinen, V. (1998) : Earthworm contribution to infiltration and surface runoff after 15 years of different soil management. App. Soil Ecol., **9** : 411~415.
- Rappoldt, C. (1993) : Modelling the geometry of worm burrow systems in relation with oxygen diffusion. Geoderma, **57** : 69~88.
- Roth, C.H. & Joschko, M. (1991) : A note on the reduction of runoff from crusted soils by earthworm burrows and artificial channels. Z. Pflanzenernahr. Bodenk., **154** : 101~105.
- Satchell, J.E. (1967) : Lumbricidae. p. 259-322. In Soil Biology (eds. Burges & Raw), Academic Press, London.
- Swaby, R.J. (1950) : The influence of earthworms on soil aggregation. J. Soil Sci., **1** : 195~197.
- Schrader, S. & Zhang, H. (1997) Earthworm casting : stabilization or destabilization of soil structure?. Soil Biol. Biochem., **29** : 469~475.
- Tisdall, J.M. (1985) : Earthworm activity in irrigated red-brown earths used for annual crops in Victoria. Aust. J. Soil Res., **23** : 291~199.
- 八幡敏雄 (1989) : すばらしき土壤圏, P167, 地湧社, 東京.

受稿年月日 : 1999年12月20日

受理年月日 : 2000年2月22日