

土壤生態系活用型農業とそれを支える土壤動物

中 村 好 男

(東北農業試験場)

Utilization of Soil Animals for Sustainable Agriculture

Yoshio NAKAMURA

(Tohoku National Agricultural Experiment Station)

1. はじめに —共通認識について—

最近、急速にその必要性が論じられているエネルギー低投入型・環境調和型農業と私の携わってきたいわゆる土壤動物との関連について記す。

低投入型・調和型農業は、畑作では土壤の有するもろもろの機能を活用することであり、その機能に土壤動物が大いに関連するとして、試験研究を進めている。

生産の現場であり、そして試験研究の場でもある耕地・草地・水田などは、それぞれ独自の

生態系を形成している。これらの共通基盤である土壤はそれぞれの生態系の一構成要素でもある。土壤動物はその名のごとく、この土壤に生活する動物の総称であり、ここでかれらの存在（機能）と農業との関連を論じるためには、土壤動物が馴染みが薄いとともにも基礎科学としての土壤動物学も歴史が短いことなどから、互いに共通してもっておくべき概念を提示する。

第一：土壤は図-1の構成と機能を持つ土壤圏つまり有機体として考えられるべきである。

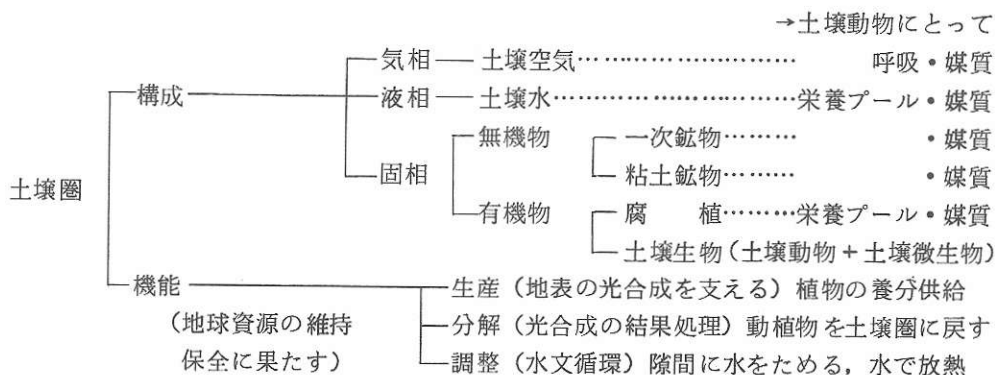


図-1 土壤圏の構成要素と機能

(『土壤圏の科学』1983を参考に作図)

この土壌圏について八幡¹⁵⁾の定義を紹介すると、『オダムが彼の著書（生態学）の中で定義している生物圏のうちで大気及び水の領域を除いたもの、と理解することもできよう。いずれにせよ、きわめて薄い層であるにもかかわらず、物質やエネルギーの変化や動きの甚だ盛んな領域で、地上の全生物に最も深いかかわりをもつ地殻の一部である』ということである。つまり地球のほんの一片がわれわれの命を支えている。構成要素の固相としての有機物に腐植とともに土壌生物を含ませていることが特徴である。

第二：土壌生物は、土壌動物と土壌微生物からなり、土壌圏の重要な構成者で、土壌圏の三つの機能と密接な有機的関連をもつ（三つの機能そのものである、ともいえる）。

2. 土壌動物は多種多様である

土壌動物とは、動物類20門のうち9門（原生動物、扁形動物、紐形動物、袋形動物、軟体動物、緩歩動物、環形動物、節足動物、脊椎動物）に属する種類の総称である（平成3年5月発行の〈検索図説〉には原生動物と脊椎動物を除く7門14綱64目604科が日本産として記載されている）。以下の文章で、ミミズ類、ササラダニ類あるいはトビムシ類と類を付して記述しているのは、それぞれが多数の種類を含むことによる。例えばミミズ類は5千～6千、ササラダニ類は1万種が世界から記録されている。これらの多種多様な動物は研究目的に応じて大きさや食べ物などから次のごとく類別し取り扱われる。

大きさ：大型・中型・小型・微小型

食べ物：捕食性・植食性・腐食性・微生物食性……

生息場：水性・湿性・乾性

食物連鎖：一次消費者、二次消費者……

私たちは、土壌動物の機能をもとに、環境形成動物群と生物調節動物群に分けている。

3. 耕地生態系における土壌動物（群集）の特徴と課題

耕地土壌はいろいろな施業（農作業）によって改変された人工土壌であり、森林の自然土壌のそれとは当然ながら異なる土壌動物相が形成される。図-2のごとく制限・調節要因ともいえる化学化（農薬散布、化学肥料施用）・機械化（耕起攪乱）に伴い土壌動物群集の多様性が低下する。⁸⁾

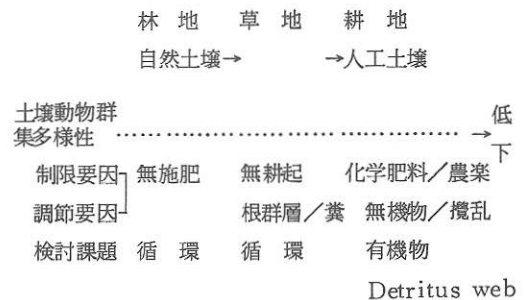


図-2 耕地生態系における土壌動物群集の特徴と課題

（中村 1986 に加筆訂正）

1) 組成と密度

表-1に示されるごとく畑地から採集できた動物は林地の13科に比べて3科と少なかった⁵⁾。また表-2のごとく密度も林地の大型類45に対し7、中型類では96に対し44であった。とくに腐食性のササラダニ類はまったく採集されず、それに反し他ダニ類（ほとんどがホコリダニ類）は林地よりも多かった⁵⁾。

表-1 各種生態系(栃木県)における大型類の出現状況

分類項目	林地	叢林地	野草地	人工草地	畑地
門 Phylum	2	2	2	2	1
綱 Class	5	4	4	4	1
目 Order	9	7	8	5	2
科 Family	13	10	13	7	3

(中村 1972 に加筆)

表-2 各種生態系(栃木県)における大・中型類の密度

動物類	林地	叢林地	野草地	人工草地	畑地
大型類 ミミズ類 (N/m ²)	4	7	6	9	0
その他	41	24	31	13	7
中型類 ヒメミミズ類 (N/20 cm ²)	10	5	8	9	1
トビムシ類	33	18	25	12	11
ササラダニ類	14	4	7	5	0
他ダニ類	21	15	14	9	27
その他	18	6	3	2	5

(中村 1972 の平均的数値)

2) 水平・垂直分布

一見して一様に見える芝地でも、そこに生息する動物は均一に分布することは無く、どこかに集中して生息することが多い。また一般的に土壌表層に生息密度が高く、深くなるにつれ密度は低くなるが、深いところで高密度の動物類もいる。

畑地では作物根や畝など動物の分布を攪乱する因子が多い。作物の根域における4つの中型動物類の分布を図-3に示した。どの動物類も作物根近くに多く生息していたが、分布様相は動物類で、また季節的にも異なっていた。例えば、ササラダニ類が夏作で0~5cm層、ヒメミミズ類が夏作で0~5cm層以下、秋作で0~5cm層に多く分布していた。

1989 July		アスパラ (n=3)			ダイコン (2)			ホウレンソウ (2)			除虫菊 (3)			エンドウ (3)			キュウリ (1)			cm
		深さ			0			5			10			15			0			
ヒメミミズ類	0-5 cm	0	0	0.7	8.0	13.5	6.0	12.5	14.5	12.0	0	0	0	0.3	0.7	0	0	1	2	
	5-10	0.3	0.7	1.0	10.0	9.5	9.0	27.0	18.0	5.0	0.3	0	0.3	0	0	0	5	2	5	
	10-15	1.0	0	0	16.5	12.5	43.5	3.5	16.0	10.5	0	0.3	0.3	0.3	1.0	0	5	6	0	
ダニ類 (ササラダニ)	0-5 cm	9.7	18.3	4.7	19.5	26.0	16.5	22.5	10.0	12.0	10.0	9.7	12.3	16.3	25.3	5.0	5	3	7	
	5-10	5.7	5.3	2.3	5.0	5.5	7.0	5.5	7.0	4.5	5.0	3.7	7.7	3.7	9.7	1.3	6	8	0	
	10-15	1.0	3.0	0.7	4.5	5.0	3.5	2.5	3.0	5.0	3.7	2.7	2.0	11.0	2.0	4.7	0	4	5	
ササラダニ類	0-5 cm	11.0	15.7	2.0	1.5	0	1.5	1.5	1.0	0.5	8.0	5.0	3.0	16.3	27.6	6.7	0	4	1	
	5-10	0.3	5.7	0	0	0	0	0	0	0.5	7.3	1.0	0	1.3	0.7	1.6	2	2	0	
	10-15	0.3	0.3	0.7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1.0	0.7	2.3	0	0	0	
トビムシ類	0-5 cm	6.0	1.7	3.0	5.5	5.5	4.0	19.0	8.0	2.5	4.3	3.7	4.7	3.0	9.3	2.3	35	39	21	
	5-10	8.7	14.7	7.7	8.0	3.5	1.5	4.0	3.5	1.5	4.0	4.0	7.3	2.3	20.0	5.3	11	7	4	
	10-15	2.3	1.0	0.3	2.5	2.5	1.5	2.5	2.0	3.5	2.0	1.0	0.7	14.7	7.6	0	0	0	11	
1989 Oct.		ダイコン (2)			ハクサイ (2)			ホウレンソウ (2)			ネギ (2)									
ヒメミミズ類	0-5 cm	1.5	2.5	4.0	1.5	2.5	1.5	3.5	0.5	1.5	0.5	0.5								
	5-10	2.5	0.5	0.5	3.0	3.5	0.5	0	2.5	3.5	1.5	3.0								
	10-15	0.5	0	0	0	0	0.5	0	3.0	0	0	0								
ダニ類 (ササラダニ)	0-5 cm	1.5	2.5	2.5	4.5	4.5	9.5	11.0	8.5	4.0	9.0	5.0								
	5-10	4.5	4.5	4.0	5.5	5.0	4.0	2.5	1.5	0.5	3.0	5.5								
	10-15	0.5	0	2.5	1.5	2.5	0.5	3.0	7.0	2.5	0.5	6.5								
ササラダニ類	0-5 cm	0.5	0	0.5	0.5	0	0	0.5	0	2.0	0	0								
	5-10	1.5	0	0	2.0	1.5	3.0	0	0.5	0	1.5	0								
	10-15	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0								
トビムシ類	0-5 cm	0	4.0	0.5	4.0	3.0	0.5	0	0.5	0.5	0.5	0	0.5							
	5-10	4.0	3.5	5.5	2.5	0.5	3.5	2.0	4.0	2.0	2.5	7.0								
	10-15	0.5	2.5	0.5	0	0	4.0	4.0	0.5	2.5	2.0	2.5								

図-3 作物根域における水平・垂直分布

数字は表面積20cm²、深さ5cm内の個体数

注. () は反復数, ▼ は根の中心

(元年度東北農試試験研究検討会議資料より)

4. 土壌動物の機能

土壌動物は生息場、土壌の3性質（物理・化学・生物性）から影響を受けながら毎日生活し、その生活（摂食・排糞・運動）を通じて、土壌の3性質に影響する。この毎日の生活を機能面からみれば、土壌圏の機能（生産・分解・調整）そのものといえる。ここでは土壌動物の具体的な機能を表わす変換・環境形成・生物調節の三つに大きく分けて、その内容を紹介する。

1) 変換

代表的な土壌動物のミミズ類と土壌発達過程との関連は表-3のごとく、11項目のうち2項目を除く全てと助長あるいは阻止するなど関連があるとされている。

そのうち腐植フォルム〈腐植層型〉は、活動した動物類でその内容や形態がほぼ決まる。表-4は腐植フォルムの生成と、それに関与する動物類を示しており⁷⁾、例えばMull(ムル)に

表-3 ミミズと土壌発達過程の関連

ミミズとの関連		土壌発達過程（佐々木・長谷川 1979 の訳）
関連あり	助長する	腐植フォルムの生成、構造形成、炭酸塩化作用、景域内における物質の再堆積、粘土の移動集積、塩類化作用、土壌攪乱
	阻止する	ポトゾル化作用、プロファイルの分化
関連なし		風化と鉱物生成、水成作用

（中村 1980）

はミミズ類の他にいろいろな動物が関与するが、ミミズ類の寄与が高いことを示している。つまりムルはミミズ糞そのものである。

表-4 腐植層型の移行と、それに関係を及ぼす動物類

pH酸性.....細菌増加.....→pH中性・弱アルカリ性

	MOR	MODER	MULLに近いMODER	MULL
重	(a) ダニ・トビムシ	(a) ダニ・トビムシ	(a) ヤスデ	(a) 大型ミミズ
要	ヒメミミズ	昆虫幼虫	等脚類	シロアリ
性	(b) 昆虫幼虫	(b) ヤスデ	(b) 昆虫幼虫	(b) ヤスデ
減	ヤスデ		大型ミミズ	昆虫幼虫
少	(c) 大型ミミズ	(c) 大型ミミズ	(c) ダニ・トビムシ	(c) ダニ・トビムシ ヒメミミズ
	(d) 等脚類			

.....団粒形成増大.....→

（中村 1980）

2) 環境形成

表-5はニュージーランドの草地で、ミミズ類の生息による土壌物理性の改良を示したもの

であり⁴⁾、計測値はいずれもミミズ類の生息しているところが高い。例えば気相は3倍にもなる。この気相増加は主にミミズ類の生活孔によ

るもので、この孔はさらに多種多様な小型の動物の生活場ともなり、草の根も利用する。草地ではルートマット（根群層）の形成が、草生産性を低下させるが、ミミズ類の存在によってその形成が阻止（つまり土壤攪乱助長及びプロファイルの分化阻止）される。

表－５ ミミズ有無と草地土壤水分

土壤層（０～１０cm）	ミミズ有	ミミズ無
有効水分（cm）	3.1	1.8
圃場含水量（％）	51.7	42.0
萎ちょう点（％）	16.2	15.6
透水性（５時間，cm）	61	29
気相（％）	31.2	8.9

（Kirkham 1981）

表－６はヒメミミズ・ササラダニ・トビムシ類等の中型動物を移入した人工土壤（実験室内）では溶脱が減少することを示している¹²⁾。とくに NH_4^+-N は移入から45週後には1／6に減少した。

表－６ 中型動物の有無と溶脱量（45週後， mg/m^2 ）

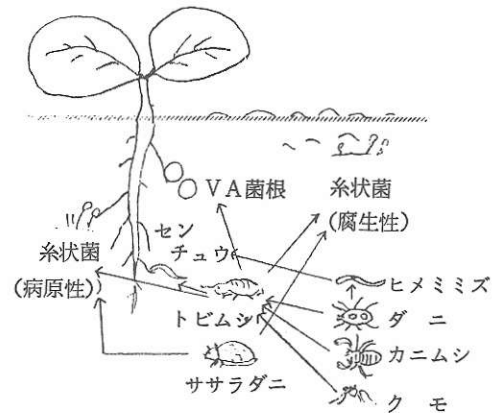
測定項目	移入有	移入無
T-N	36.1	40.3
NH_4^+-N	0.2	1.2
NO_3^--N	1.3	9.5
PO_4^--P	2.2	3.5

（Setälä & Huhta 1991）

3）生物調節

図－４にダイズ根を巡る食物連鎖を、トビムシ類を中心にして示した。矢印の先は食べられる側を表わし、トビムシ類は糸状菌（病原性や腐生性）やセンチュウ、VA菌を捕食する。と

ころがトビムシ類はダニ・カニムシ・クモ類などに捕食される。このトビムシ類の中にはコムギの芽を食べる害虫も含まれるが、大半は菌食性とされる。最近この菌食性の性質を活用した生物防除の取組みがなされ、すでに育苗期のワタ苗立枯病やテンサイ苗立枯病の発病防止にこのトビムシ類が効果があることが報告されている。著者らも同様な方法でキュウリつる割病の発病防止効果を、最近確認することができた¹⁰⁾。その他に土壤動物には、世界中にひろく分布する菌食性センチュウ類が病原糸状菌をよく食べ、その生長を抑制したり、病害抑止土壤には病原微生物を摂食する原生動物が生息する。



図－４ 作物根（豆根）域の食物連鎖

4）植物（作物）の生長への効果

これら土壤動物の機能すなわち変換・環境形成・生物調節の結果、植物生産（有機物生産量）が保証され、さらに促進されたりする。

図－５は表－６と同じ実験でトビムシ・ササラダニ類などの移入によるカバの苗¹²⁾、図－６はフトミミズの移入による大麦生育への効果を実験した例で²⁾、どちらも動物を移入すると（図－５ではF）植物（作物）の生長（乾物重又は子実重）が増加した。大麦ではミミズ移入

個体数の増加に伴い稈長が伸長し、子実中のCa含量が増加した。この現象はダイズでも同様であった。ミミズ類の移入が作物体のビタミンB₁₂含量を増加させるともいわれている。前述の草地ではミミズ類の生息密度と草生産量とは相関が+であった。

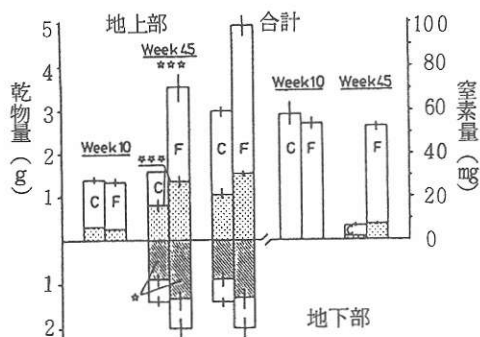


図-5 中型動物を移入 (F) したカバ苗 (Setälä & Huhta 1991)

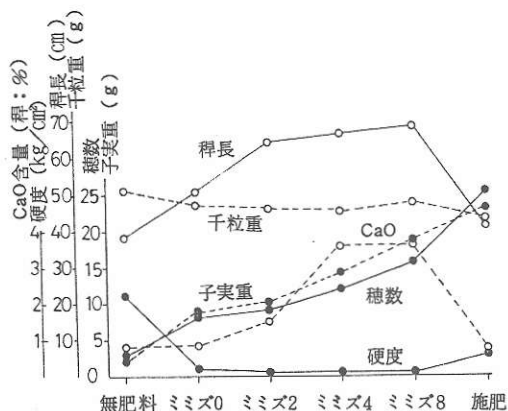


図-6 大麦播種とともにミミズ移入 (板倉 1990 より作図)

5. 土壌動物と土壌微生物の関連

土壌生物を構成する土壌動物と土壌微生物は次のごとく相互に関連している。

1) 動物の餌としての微生物：草地でセンチュウ類の60%が細菌食であった。ヒメミミズ類の細菌摂食量は300～400kg/ha年に達する。前述したようにトビムシ類の病原菌の摂食による

生物防除が開発されつつある。

2) 土壌微生物の餌としての動物：センチュウ類を捕捉する菌がいる。

3) 相利的：マツ枯葉の表面積は、ササラダニ類が摂食すると1万倍（糞として）になり、微生物の活動域が増加する。トビムシ類の菌糸摂食がその菌の活性を促進する。図-7に牧草の分解消失とそれに関与する微生物と動物との関連¹⁴⁾をしめした。

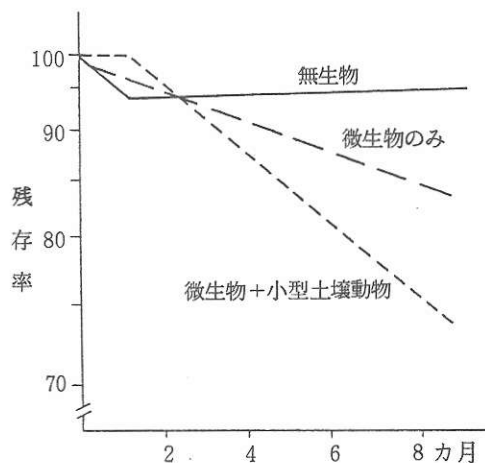


図-7 牧草の分解消失とそれに関与する生物 (Vossbrinck et.al.1979 を改写)

4) 阻害的：微生物による抗生物質の分泌。

6. 土壌動物の研究史

<世界>

1881: Darwin 著『ミミズの植土形成』

1921: Francé が < Edaphon >¹⁾を提唱。その (Edaphon = 土壌生物) 数を増大させる方法は農業上土壌肥沃度や生産力を大きくする意味を持つ、とした。

1930: Bornebusch が土壌動物群集の主な構成者の呼吸を合計して群集全体の呼吸量の計算を試みた。

1955：国際シンポジウムのまとめ『Soil Zoology』発刊
 1961：専門誌 Pedobiologia 発刊
 1964：専門誌 Revue d'ecologie et biologie du Sol 発刊
 1981：Darwin 100年祭
 1991：11回国際土壌動物学会開催
 <日 本>
 1967：土壌動物研究会発足

1973：青木著『土壌動物学』発刊
 1975：横浜国立大学土壌環境生物研究室設置
 1978：土壌動物学会創立
 1991：14回土壌動物学会開催
 『土壌動物検索図説』発刊

7. 土壌動物を試験（農業関連）研究の対象に入れた取組み（主なもののみ；表－7）

表－7 各国の取組み状況

国 名	主 体	年 度	概 念
ア メ リ カ	Georgia Univ.	1978－	Mesocosmoとしての農業生態系
	Ohio Univ.	1982（1962）－	土壌保全と耕起
オ ラ ン ダ	Wageningen	1968－75	干沢地肥沃化 Natural agricultural ecosystem
ア フ リ カ	IITA	1973－	被覆と無耕起 Mulch-ridge tillage
スウェーデン	Swedish Univ.	1979－	Ecology of arable land
ソ 連 邦	Moscow Univ.	1965	Zoological methods in soil diagnostics
ニュージーランド	NZ DSIR	1940－	草地肥沃化

1) アメリカにおける研究の現状－ジョージア州立大学Dr. Odum研究室を中心に－
 Dr. Odumについては、その著書『Fundamentals of Ecology』（1953）は1956年に、さらに『ECOLOGY』は1967年に邦訳され、よく知られており、ここに改めて記す必要がないかも知れない。人間を含めた自然を“生態系”としてとらえ、それを構成する種類やその量も重要であるが、それらがどのように働いているか、すなわち機能こそより重要であるとした。
 1978：“The Mesocosmo”の概念に基づき農業生態系研究を開始。試験圃場は8区（1区1012m²）；処理は耕起と無耕起で各4反復；作物は冬作にライ麦とクローバー、夏作にダイズ（又はソルガム）；無殺虫剤、冬作と夏

作の間に除草剤1回散布、化学肥料施用。研究課題は、物質収支とその保持、無殺虫剤での作物と昆虫の関連、土壌とリター生物、分解プロセス及び冬作と夏作の間に除草剤1回散布での作物と雑草の関連等。そのうち土壌生態系に関連する報告は以下のごとくである
 1980：地上部現存量（ソルガム）：耕起＞無耕起；バック法による分解量：耕起＞無耕起；土壌水（50cm深）の窒素濃度：耕起＞無耕起；土壌節足動物生息密度：耕起＜無耕起
 1983：地上部節足動物組成の複雑度：耕起＜無耕起；作物加害（被食量）：耕起＞無耕起
 1984：窒素循環は耕起と無耕起で異なる経路をたどる、その差異は年次とともに大きくなる。無耕起の分解は自然生態系に似ている。生物

仲介窒素保持機構を提案。

1984: P, K, Ca, Mg 循環は耕起と無耕起で異なる経路をたどる。

1985: 土壤節足動物及びミミズ生息密度: 耕起<無耕起; ヒメミミズ: 耕起>無耕起; 無耕起は作物残渣分解消失に土壤節足動物およびミミズなどの soil biota が有効。

1985: 硝化と脱窒は 5 cm 深: 耕起<無耕起; それより深いと耕起>無耕起

0~21cm 層の合計 (年間) は耕起=無耕起

1989, 1990: 無耕起の土壤ダニ (ササラダニ) の生息密度は土壤水分保持力と関連

1986: 以上から; 無耕起は表層土壤に物理的・化学的な層別を生じ, 栄養を保持する。耕起は有機物分解とミネラル化が促進され, 作物と雑草による収奪を増加させる。このことから残渣食物連鎖 (Detritus food webs) を提案。

2) オランダ — 自然管理研究所 Dr. L. Bal を中心に—

1957: Oostelijk Flevoland の干拓終了

1962: 農家移住

1966: ミミズ移入 (草生栽培リンゴ園)

1968-78: Zoological ripening 研究実施, Müller (1840-1926) の腐植の研究 (Darwin 『ミミズ』188 年から強い影響を受ける) が基礎で, ミミズに力点がおかれた。

1982: それまでの結果から, 『Zoological ripening of soils』pp.365 を刊行。

《土壤動物の活動により変化した岩石や土中の物質; 腐植 (humus-form) を含む》

《年間 100-200 t/ha 以上 Zoological ripening される; 10 年位内に 6-12cm の A₁ 形成される; これは早い時期からのミミズ移入による》

《“natural” agricultural systemes》p. 89

を強調

1988: Dutch Programme on Soil Ecology of Arable Farming Systems

土壤構造形成への土壤生物寄与把握

3) アフリカ — ナイジェリア IITA Dr. R. Lal を中心に—

1971: 無耕起被覆によるトウモロコシ栽培

1975: 作物残渣による被覆 (4-6 t/ha) は生物 (土壤微生物と土壤動物) 活動を高め→土壤浸食は少なくなり, 土壤構造は維持される

1982: 無耕起被覆の基盤はミミズ活動である (熱帯では)

1989: 無耕起被覆条件での土壤構造維持はミミズ活動による (熱帯では)

1990: Ridge-tillage の提唱

4) ニュージーランド — 農務省 Mr. Stockdill を中心に—

1925: 草地へミミズ移入 (民間人)

1940: ミミズの土壤および草生産への効果調査開始 (農務省)

1965: ミミズ糞・体内の植物生長促進物質を確認

1983: 草地へミミズ移入の国家事業

5) 日本

1964-67: ニュージーランドからミミズによる草地肥沃化促進の専門家が来道し, それを基礎に北海道開発局を中心に『地中動物による草地土壤保全』調査; ミミズ分布実態, 優良種の分布確認, 草地へミミズ移入されたが草地が耕起され, 結論でず。

1976-85: 北海道名寄市の放棄畑で, 自然農法グループにより『重粘性土壤畑の土壤動物による育土』(1987 刊行) 調査研究行われる。

作物、土壌の物理・化学・生物性が測定された。多数の新種の土壌動物を記録。

要約：連作をすること、できるだけ地表面を攪乱しないこと、堆肥や被覆材料などの有機物は化成肥料・人為合成農薬などが使用されていないものを選ぶこと、堆肥材料や被覆材料の質・量に留意すること、耕作者自身が作物（植物）及び土壌生物（動物・微生物）のことを理解し、管理作業のなかでそれを反映させること。

1984－87：農業環境技術研究所（つくば市）の畑で水質保全研究室により『土壌生物浄化機能活用』調査研究行われる。（現在、圃場は縮小されたが、業務科で維持している?!）

陸稲～麦の同一圃場内輪作；Aの'82－83はBと同じ、有機物は'84から；4処理：

A：無耕起・無化成肥料・無農薬・有機物（枯れ葉等の堆肥）区→有機・自然農法

B：無耕起・無化成肥料・無農薬・無有機物区→無処理

C：耕起・化成肥料・農薬・無有機物区→慣行（化学）農法

D：無耕起・化成肥料・農薬・無有機物区→無耕起農法

陸稲と麦の収量は $C > D > A > B$ ；Aの収量

は次第に増加し、4作目の陸稲はCの79%となった。土壌動物の組成と密度は $A > D > C > B$ 。

1989：財団法人『自然農法試験農場』開設

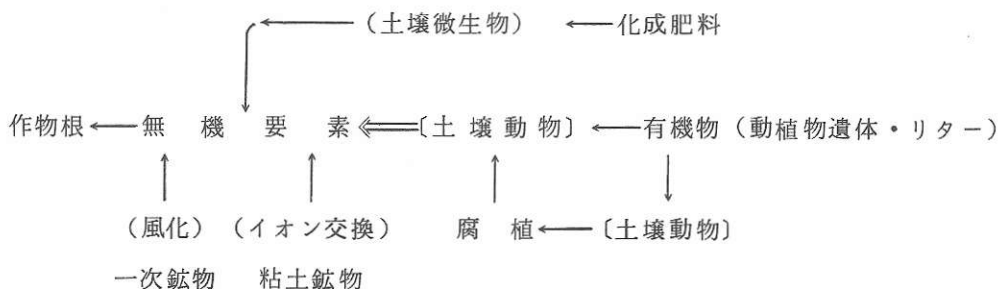
8. 土壌生態系（機能）活用型農業における土壌動物の位置

前述のごとく土壌動物の評価は小規模（ポットや温室）から大規模（森林・草地）な段階まで進んできた。さらにいくつかの国では耕地においても積極的に活用しようとしている。土壌生態系（機能）を活用する農業（産業としての）において、土壌動物はどう位置づけられるのだろうか。

1）物質循環

まず作物生産にとって重要な無機要素を例にすると、土壌動物の位置は図－8のごとくであろう。

土壌動物は生長（同化）に必要な物質を化成肥料から得ることはまず不可能で、有機物（作物残渣など）から直接得たり、複雑な食う～食われる関係（食物連鎖）を通じて得ている。その活動の結果、窒素は土壌動物個体の代謝終産物、脱落物及び生物体（死体）などとして、有機物から直接的なルートで変換される。また腐植（不消化排出物、例えば糞など）の型になり、



図－8 無機要素と土壌動物の関連

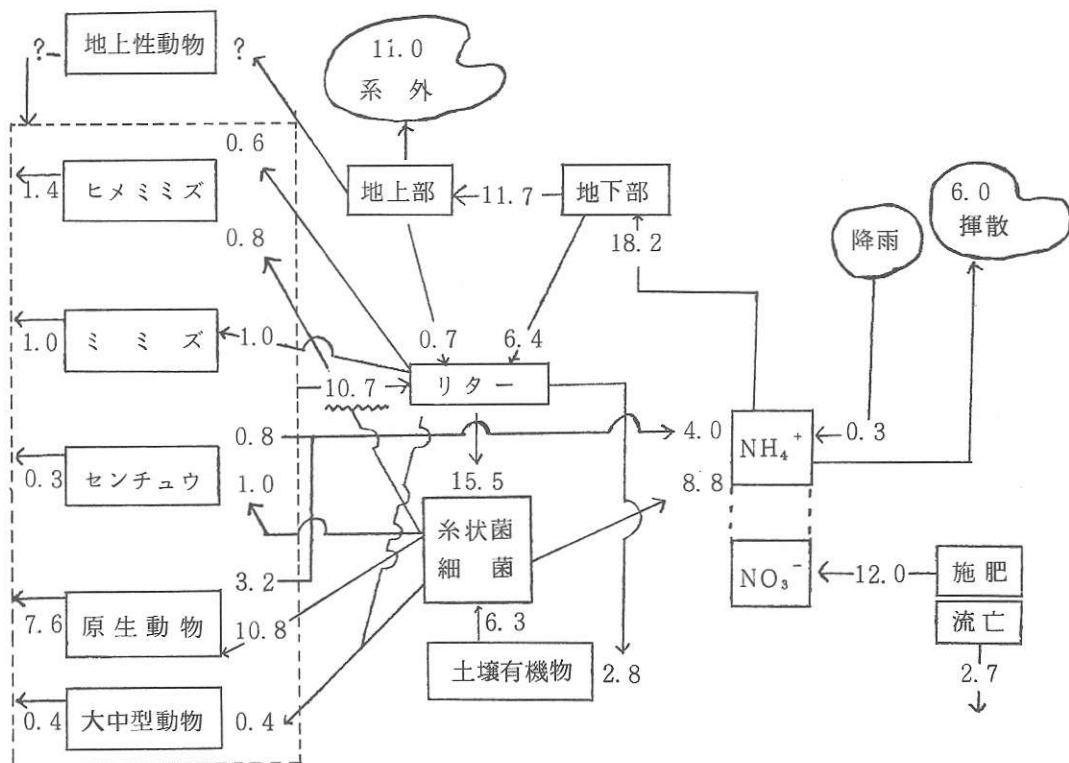


図-9 大麦圃場の窒素循環 (g N/m²年)
(Rosswall & Paustian 1984を改写)

さらに別の動物類が関与するという間接的なルートで変換される。図-9はこの関連を石灰窒素 120 kg/ha年施用の大麦圃場における窒素循環で示したものである¹¹⁾。計測はスウェーデンで、0~27cmの深さを対象として行われた。左の地上性動物以外は土壌動物である。この図で特徴的なことはリター（作物茎葉残渣）から作物根に流れる無機窒素は微生物 8.8 に対し土壌動物が 4.0 で、その合計は化成肥料からの値に匹敵すること。さらにリターを微生物は一方的に無機化するが、これに対し土壌動物はその微生物からも取込み、リターに相当量戻していること等である。なおこの報告には、無肥料区との比較値があり、無肥料では系外（収獲物とし

て）へは 1/3 に減少、それに伴いリター（地上・地下部）へも 1/2 に減少するが、土壌動物からリターへの戻りの減少（10.5→10.05）は少なかったという。つまり相対的に戻りの割合が増加した。

筆者の知るかぎり類似のデータは我が国には無さそうである。それは耕地の土壌動物を評価できるほど、土壌動物群集の豊富な圃場は無いためであろう。

物質循環とともに一般生態学の 2 大原理である、エネルギーの流れも重要であるが、適当な例が見当たらない。永続的生態系では、全消費量は有機物年間生産量に等しく、その方向に生態的遷移は起こるとされる。

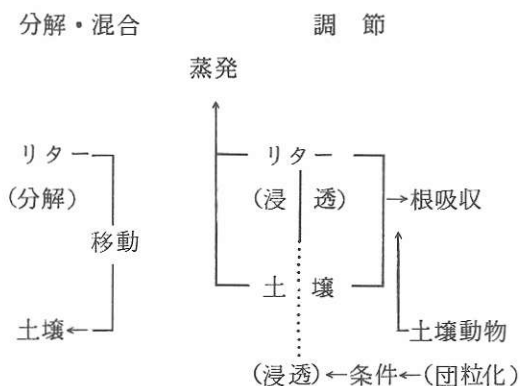


図-10 土壌動物の分解混合調節活動

2) 分解・混合・調節

無機要素供給の化成肥料ルートからの依存割合を軽減あるいは脱却するためには、土壌動物（土壌微生物を含めることは当然である）ルートを強めることである（6節のFrancéの指摘そのものである）。それには、物質循環がスムーズに行われること、つまり窒素（リター）がどれだけあるかよりも、移動循環の速度がより重要である。その速度は図-10のごとく土壌動物の分解・混合活動の程度、さらに作物根の伸長や吸収しやすい水分条件の調節など環境の形成活動の程度に大きく依存する。



図-11 土壌圏の隙間は住み家：その環境の変化に伴う分布の変化
(Ghilarov 1949, Vannier 1987を参考に作図)

9. 有機物は土壌動物の餌・棲み家・環境

土壌動物の機能を活用し無機要素を求めるとすれば、有機物（作物残渣など）の存在が必要条件となる。

従来から畑土壌への有機物施用効果として土壌の物理性改良がある。その効果は土壌動物に対しては棲み家（隙間）の提供であり、生活環境条件の整備でもある。ミミズ類のように棲み家（隙間）を自ら作る動物もいるが、土壌動物の多くは既に作られた隙間を利用している。その隙間の環境条件は図-11のごとく、乾性 ↔ エダフィック ↔ 湿性と変化する。変化は急激なこともあるし、緩慢なこともある。乾球温度

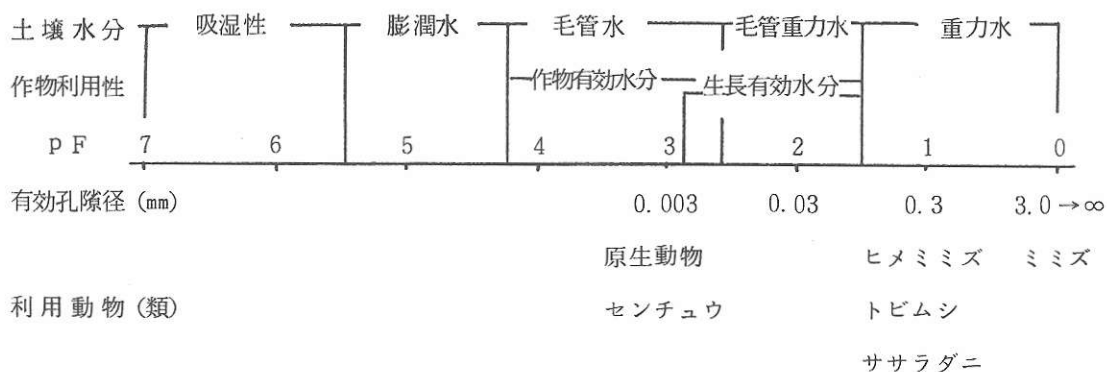


図-12 土壌水分、有効孔隙と利用動物の関連

15℃、湿球温度10℃及び相対湿度51%の条件下では、pF 4.7以上が乾性で、pF 2.5以下が湿性で、その中間がエダフィックになる。それぞれの条件に応じて隙間に棲む動物は移動したり、休眠したり、死ぬこともある。

図-12は土壤水分量、孔隙の内径とそれを利用する動物類を示したもので、利用可能な有効孔隙は当然ながら、pF に大きく影響され孔隙が十分でも生息が制限されることもある。つまり孔隙内の空気・水の成分・濃度の調節によって動物類の生息を管理する可能性をうかがわせる。

1) 素 材

施用される有機物は棲み家・生活環境とともに餌でもある。表-8は素材の差異が組成・密度に反映すること、図-13は単純な有機物は密度を高めるが、組成はむしろ単純化する⁶⁾ことを示している。

しかしながら単に餌だけからこの素材間の差異を判断することは早計でもある。なぜなら有機物は餌であるとともに生活環境条件（微生物食性動物には微生物の発育条件でもある）を変化させる要因でもあり、有機物の選択には素材そのものも吟味すべきであろう。

表-8 素材の異なる有機物と土壤動物

素 材 施 用 法	羊 生	糞 堆肥	油 生	粕 堆肥	稲 生	ワラ 堆肥	桑条 生	化肥	無肥
ヒメミミズ類	14	4	40	36	11	2	9	3	2
ササラダニ類	38	16	3	26	74	6	89	1	4
トビムシ類	56	99	33	26	21	18	18	3	5

(板倉・中村未資料より；個体数/20cm² (100 ml)；作物：ハクサイ；土壌：厚層腐植質黒ボク土造成相；調査：収穫時採取)

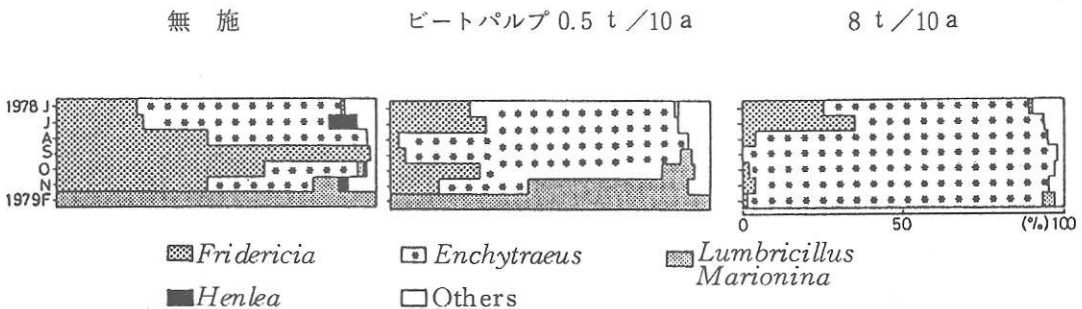


図-13 ビートパルプ施用ジャガイモ畑のヒメミミズ類の属組成 (%)
(中村ら1979)

2) 遷移

土壤に施用された有機物が分解消失する際、当然その内容も変化する。それに伴いその有機物に関与する動物組成も変化（遷移）する。つまり餌 $\longleftrightarrow$ 動物組成は相互に影響しあう。表-9に切断桑条の分解消失に伴う中型土壤動物の密度を示した³⁾。ガラス繊維は関与する動物の排除を考慮して用いたが、予想に反し多くの動物が侵入していた。侵入した動物の組成は互い

に似ていたが、侵入時期に差異があった。トビムシ、他ダニ及びヒメミミズ類は早い時期に侵入し、ササラダニ類はそれより後の時期に侵入していた。このササラダニ類をさらに種類別にすると、1種はほぼ全期間であったが、その他は時期が限定されていた。このことは、豊富な組成の維持には、いろいろな分解段階の有機物が同時期に存在することが条件であることを示している。

表-9 ガラス繊維と2ミリ網に包み、土壤（5cm下）に埋めた切断桑条から得た中型動物
（2試料の合計：ガラス繊維（左）と2ミリ網（右））

経過日数	30	59	91	121	153	184	215	243	275	354
トビムシ類	1/169	36/35	72/115	33/99	41/31	23/72	69/23	43/14	29/36	1/56
ダニ類	29/180	90/112	13/73	35/74	82/132	92/97	119/25	71/63	95/166	1103/241
ササラダニ類	0/2	0/2	0/0	2/3	0/2	3/19	0/5	0/15	3/17	0/7
ヒメミミズ類	16/41	36/60	43/31	1/6	15/33	1/6	0/0	0/0	0/0	0/0

（板倉・中村1991）

3) 作物好適土壤動物相の形成をめざして

土壤動物群集の多様性が低下する運命にある耕地において、土壤動物を活用する方策はあるのであろうか。

図-14に自然生態系から人工生態系に移行した際の土壤動物相の変化を模式した。仮に自然生態系の土壤に生息する動物類のそれぞれの繁栄程度（世代や性比構成が良い等）を100%とすると、機械化・化学化の進んだ耕地生態系の人工土壤では、まず種数が減少する、特に作物に有益（捕食・菌食性）や無関係のグループは激減する。さらに残った種類の繁栄程度もかなり低下し、変化は短時間に劇的におこりうる。反応の目安は幾段階もある。作物残渣は枯れ葉などに比べ窒素が高く、リグニンが低い傾向にあり、細菌を中心とした微生物の

攻撃にさらされやすく、細菌 $\rightarrow$ 原生動物・細菌食センチュウ $\rightarrow$ ヒメミミズ類の連鎖が発達してこよう。

その人工土壤で、制限要因を排除、例えば省・無耕起（農薬）あるいは有機物施用などをすると、当然ながら消えた種類は回復しないが残存種の繁栄程度が回復する。その程度や速さは除去された制限要因の内容と関連するとともに動物類間で大きく異なる。例えば欧米で拡大している無耕起（化成肥料と農薬は施用）では、有機物の表層集積に伴い糸状菌を出発点とし、糸状菌食小型節足動物・センチュウ $\rightarrow$ ミミズ類の連鎖が発達してこよう。

土壤圏機能を活用するならば、さらに徹底して制限要因を排除し種類組成の多様性を高めることである。多様性と安定性との関連は不明な

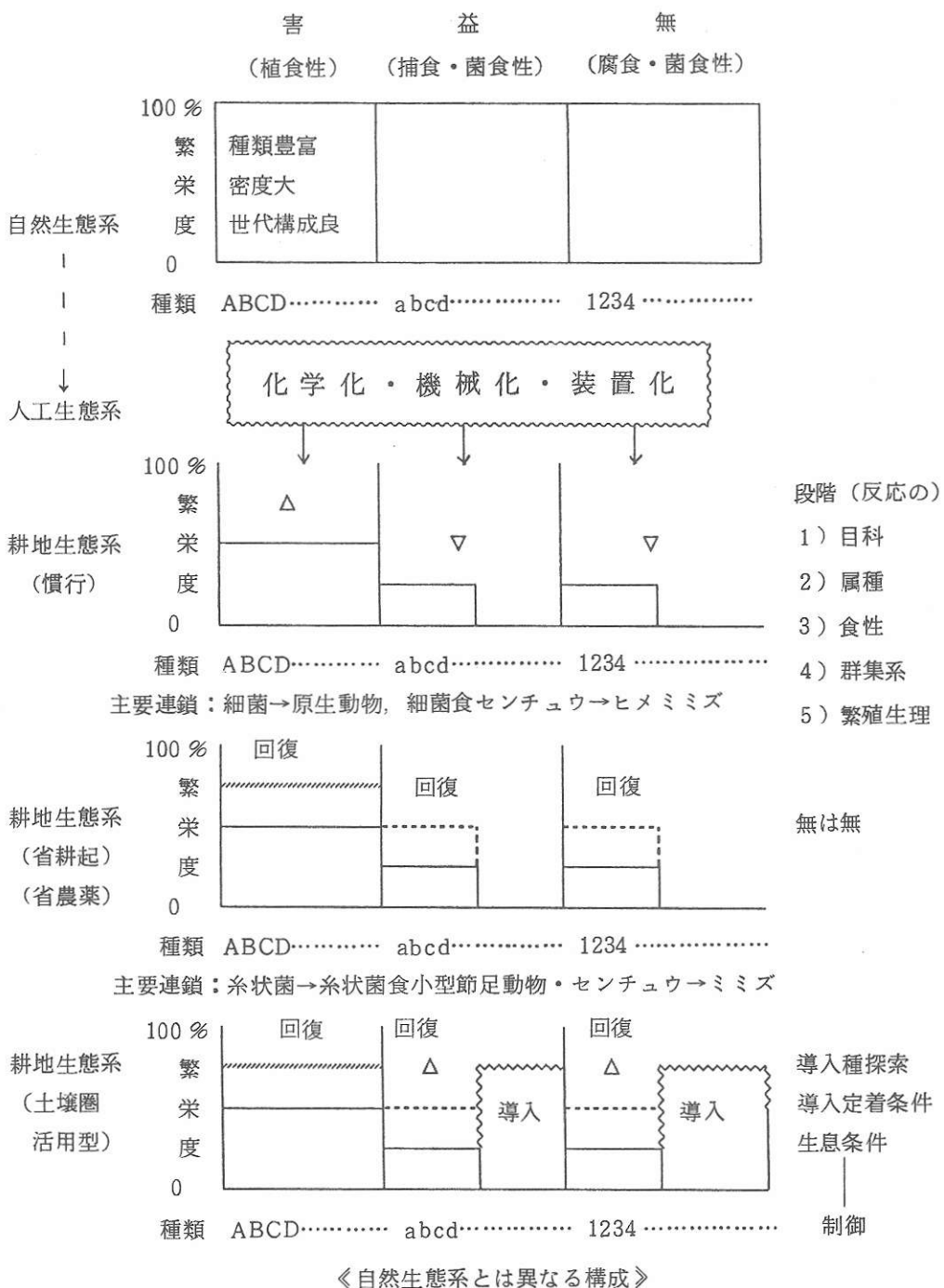


図-14 自然生態系から人工生態系に移行したさいに予想される土壌動物の変化

部分がいまのところ多いが、多様性の利益は安定性の増加といわれ、遺伝子給源が大きければ大きいほど、適応ポテンシャル（潜在力）も大きくなる。残存種の繁栄程度の回復維持を図るとともに、消えた種の移入を行なう。さらに作物生育に好適な動物群集形成をめざして、欠けていた動物類の移入も必要であろう。その結果動物群集は自然生態系とは必然的に異なるものとなる。移入は動物自体の運動（分布拡大）か人工移植でなされる。北海道重粘土畑で10年間にわたり、畑の周囲の草地（雑草主体）からの移入及び森林の林床堆積物とともに動物を持ち込みその定着を調べたところ、移入は可能であるが、定着はその後の畑管理条件に大きく影響されていた。ニュージーランドの草地でミミズ類を移植したところ、数年間は移植地点からほとんど移動しないが、その後は急激に分布が拡大した¹³⁾（図-18参照）。新しい場所への侵入拡大にはかなり時が必要のようである。

10. 今後の課題

土壤動物、土壤圏、土壤生態系、耕地生態系などそれぞれにはまだ多くの残された課題がある。例えば土壤動物の分類では図-15のごとく、ミミズ類だけでも毎年多数の新種が記載される。ほとんど未着手の動物群もある。

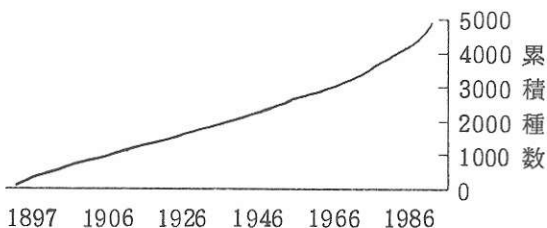


図-15 『Zoological Record』のOligochaetaに新種記載された数

各動物群の個体、個体群及び群集の各レベルでの課題もある。例えば個体レベルでは生活史、現存量、物質経済（摂食、不消化排出、同化、呼吸、窒素代謝終産物、再生産、生長）及び物質経済のおおのおおを条件づける行動、その時間的变化、環境要因との関連などである。この個体レベルの結果が、個体群あるいは群集レベルでは通用しないことが往々にしてある。

1) アプローチ

課題解決は、観察（比較調査など、表-1, 2など）、非破壊法（放射性物質による追跡など）、消去法（物理・化学的に目的以外の動物類を排除する、表-8など）あるいは実験法（つみ上げ法、図-5, 6；マイクロコスモ作成など）で行われている。

2) 動物（基礎）実験から作物（応用）実験へ

作物に対する土壤動物の効果を、圃場規模で測定するにはそれなりに土壤動物が豊富であることが必要条件である。農業環境技術研究所（つくば市）での陸稲～麦の同一圃場輪作で測定されたササラダニ類の変動を図-16に⁹⁾、陸稲の生育経過と収量変動を図-17に示した。処理は無耕起・無農薬・無化成肥料で枯れ葉などの堆肥のみ施用（図中のA）、無処理（B）、耕起・農薬・化成肥料施用（C）及び無耕起・農薬・化成肥料（D）である。ササラダニ類はA区が他3区に比べ常に多数の種類が採集された。最初の数値が高いのは枯れ葉などの堆肥とともに移入したと思われる。累積種数が時間経過とともに増加しているのは、採集種類の入れ替わり（遷移）による（生息場～土壤圏の変化を示すといえる）。ミミズ類は3年目以降から密度を増し最終調査時点の土壤表層に多量のミ

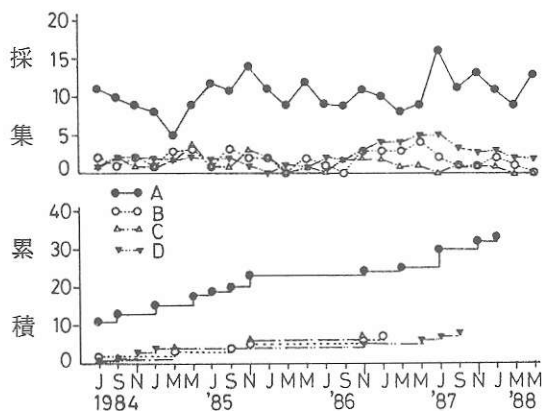


図-16 ササラダニの採集(上)・累積(下)種数

注. A:有機自然(枯れ葉などの堆肥のみ);
B:無処理; C:慣行(化成); D:無耕起
(化成); 陸稲~麦の同一圃場輪作(本文7章
参照, Nakamura 1989)

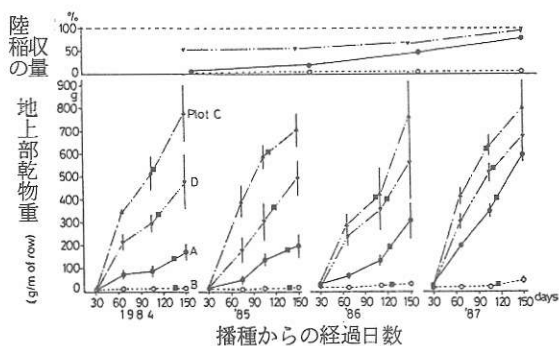


図-17 陸稲の収量(上)・地上部乾物重(下)
注. A~Dは図-16と同じ(中村・未発表)

ミズ糞が集積していた。作物の地上部乾物重
(稈長と茎数を反映)は1年目のA区がC区の

1/4以下で、収量も1/10であった。ところが
4年目には地上部乾物重は3/4、収量は4
/5弱(79%)に達した。

図-18にこの作物収量の推移と前述のミズ
類分布拡大推移を示したが、4(~6)年以降
が土壤動物を因子に加えた作物試験といえるの
であり、それ以前は土壤動物試験であろう。

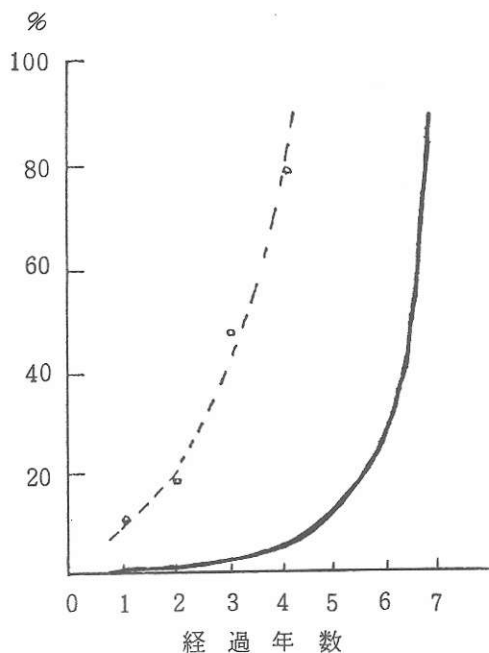


図-18 ミミズ類分布拡大と陸稲収量の推移
注. 実線:ミミズ類分布拡大(Stockdill 19
82)

点線:陸稲収量(図17のA区のC区に対す
る指数)

引用文献

- 1) Francé, R. H. 1921. Das Edaphon. Untersuchungen zur Oekologie der bodenbewohnenden Mikroorganismen. Franck, Stuttgart. p. 1-99.
- 2) 板倉寿三郎, 1990. フトミミズが大麦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.

- 3) 板倉寿三郎, 中村好男. 1991. ガラス繊維ろ紙法とリターバック法による有機物の分解と土壤動物 (土肥誌投稿中).
- 4) Kirkham, M. B. 1981. Earthworms and Soil Physical conditions: Darwin to the Present and future research needs. Proceedings of workshop on the role of earthworms in the stabilization of organic residues, p. 86-115.
- 5) 中村好男. 1972. 草地の土壤動物相に関する研究. 1. 施肥と中型土壤動物相について. 日本草地学会23回大会要旨. p. 10.
- 6) 中村好男, 藤田正雄. 1979. 有機物被覆がヒメミズ類の個体数及び垂直分布に及ぼす効果. EDAPHOLOGIA 20: 1-3.
- 7) 中村好男. 1980. 土壤における生物の役割, とくにミミズと土について. ペドロジスト 24 (1): 43-50.
- 8) 中村好男. 1986. 土壤生態系におけるミミズの役割, 農林水産技術研究ジャーナル 9(8): 12-15.
- 9) Nakamura, Y. 1989. Oribatids and enchytraeids in ecofarmed and conventionally farmed dryland grainfield of central Japan. Pedobiologia 33: 389-398.
- 10) 中村好男, 松崎 巖, 板倉寿三郎. 1991. キュウリつる割病菌に対するトビムシの摂食. 14回日本土壤動物学会大会要旨. p. 18.
- 11) Rosswall, T. ; Paustian, K. 1984. Cycling of nitrogen in modern agricultural systems. Plant and soil 76: 3-21.
- 12) Setälä, H. ; Huhta, V. 1991. Soil fauna increase *Betula pendula* growth: laboratory experiments with coniferous forest floor. Ecology 72: 665-671.
- 13) Stockdill, S. M. J. 1982. Effects of introduced earthworms on the productivity of New Zealand pastures. Pedobiologia 24: 29-35.
- 14) Vossbrinck, C. R. ; Coleman, D. C. ; Wooley, T. A. 1979. Abiotic and biotic factors in litter decomposition in a semiarid grassland. Ecology 60: 265-271.
- 15) 八幡敏雄. 1989. すばらしき土壤園. 地湧社. 167 p.