

土壌有機物の重要性

旱魃抵抗性土壌および
持続的食料生産への鍵



表紙写真 背景：ホンジュラス、FAO/18884G, Bizzarri
差込：ホンジュラス、FAO/18907/G, Bizzarri

FAO出版物の請求は下記へ。
SALES AND MARKETING GROUP
Information Division
Food and Agriculture Organization of the United Nations
00100 Rome,Italy

E-mail:publications-sales@fao.org

Fax:(+39) 06 57053360

Web site: <http://www.fao.org>

The importance of soil organic matter

Key to drought-resistant soil
and sustained food and production

FAO
SOILS
BULLETIN

80

by
Alexandra Bot
FAO Consultant

and

José Benites
FAO Land and Plant Nutrition
Management Service

Published by arrangement with the
Food and Agriculture Organization of the United Nations
by
Japan Association for International Collaboration of
Agriculture and Forestry

本書で用いられた名称および資料の表示はいかなるものであれ、いかなる国、地域あるいは市または当局の法律的存在あるいは発展の状況に関するFAOの見解を表明するものではなく、また国境あるいは、境界の決定に関するFAOの見解を表明するものでもない。

本書の原文は、国連食糧農業機関（FAO）によって発行された「The importance of soil organic matter」（ISBN 92-5-105366-9）である。

全著作権は保護されている。本書中の資料の教育・その他、非営利目的での複製および配布は、出所の明示を条件に、著作権者からの事前の文書による許可なしでも認められている。本書中の資料の転売その他、商業目的での複製は、著作権者からの事前の文書による許可なしでは、禁止されている。それらについて許可申請は下記へ提出すること。

Chief
Publishing Management Service
Information Division
FAO
Viale delle Terme di Caracalla, 00100 Rome, Italy
あるいは 下記e-mailアドレスへ。

copyright@fao.org

本書の翻訳の責任は、(社) 国際農林業協力・交流協会（JAICAF）にあり、FAOは、翻訳の正確さに関し、一切の責任を負わない。

©FAO 2005

©JAICAF 2007 Japanese version

目 次

謝辞	ix
まえがき	x
略語リスト	xii
第1章 はじめに	1
第2章 有機物分解および土壤食物連鎖網	4
土壤有機物	4
土壤食物連鎖網	5
分解の過程	6
非腐植物質：意味と機能	7
腐植の組成と機能	8
第3章 有機物含量に影響する自然要因	10
温度	11
土壤水分および水飽和	11
粒径組成	12
地形	12
塩分濃度および酸性度	13
植生およびバイオマス生産	13
第4章 有機物含量に影響する人為	15
土壤有機物に影響する人為的攪乱	15
土壤有機物を減少させる行為	15
バイオマス生産の減少	16
永年植生の転換	16
混合植生の作物単作および草地への転換	16
高収量指標	17
休閒裸地の利用	17
有機物供給の減少	17
自然植生および作物残渣の焼却	17
過放牧	18
作物残渣の除去	18
分解速度の加速	18
耕作	18
排水	20
肥料および農薬の使用	20

土壌有機物を増加させる農法	20
バイオマス生産の増加	21
植物に対する水利用率の向上：集水および灌漑	21
釣合いのとれた施肥	22
被覆作物	22
作物立毛の改良	24
アグロフォレストリーおよび等高線栽培	25
森林再生および植林	28
自然植生の再生	29
土壌有機物供給の増加	29
火災からの保護	29
作物残渣の管理	29
飼料作物の収穫によらぬ放牧による利用	30
総合的病虫害防除	31
家畜厩肥あるいはその他の炭素に富む廃棄物の施用	31
コンポスト	31
マルチあるいは永年的な土壌被覆	32
分解速度の減速	33
低または不耕起	33
第5章 旱魃抵抗性土壌の創出	38
土壌有機物が土壌の諸性質に及ぼす影響	38
雨水の非効率的利用	38
土壌水分の増加	39
土壌侵食減少および水質改良	41
第6章 持続的食物生産の重要な要因	44
作物生産性の向上	44
施肥効率の向上	44
停滞水の減少	45
収量の増加	45
除草剤および殺虫剤の削減	47
生物多様性の増大	48
弾力性	49
第7章 有機物の還元および炭素の隔離における保全的農業の役割	50
保全農業の原則	50
有機物の残留	50
炭素隔離の増加	51

第8章 結論	54
参考文献	56
付録	
1. 土壤生物	63
2. 土壤の諸性質に対する有機物の影響	76
ボックス一覧	
1. 健全な土壤生態系の機能	5
2. 腐植物質は必要に応じて植物に供給できる栄養を保持する。	8
3. 土壤の有機物含量を増加する方法	20
4. 植え穴	24
5. 世界のアグロフォレストリーの例	25
6. 農民のクエズングアル法の受け止め方：利益と不利益	27
7. 北タイ高地におけるマルチ法	34
8. 改良有機物管理法は引き合うか？	46
9. 異なる耕作法がフンコロガシ幼虫の穴およびその体積に及ぼす影響	49

図一覧

1. 土壤有機物の成分、それらの働き	1
2. 炭素サイクル	4
3. 作物栽培の各段階での微生物バイオマスの変動 慣行農業と残渣保存・高有機物還元体系との比較	6
4. 閉じた循環	10
5. マメ科およびイネ科植物種の葉と根の組成	13
6. 開いた循環系	15
7. 原生林、休閑、クズ、イネ科草本植生下の土壤大動物相の比較	16
8. パラナ（ブラジル）の土壤における有機物含量の評価	21
9. 種々の被覆作物の乾物の減少	23
10. 異なる作物輪作体系における根粒菌数	35
11. 処理直後の生・死ミミズ数	37
12. 土壤被覆量が雨水表面流去水および浸透に及ぼす影響	39
13. 異なる管理下における水浸透	39
14. 慣行的耕起および保全農業下における土壤の貯水量	40
15. 種々の土壤被覆が土壤水分貯蔵に及ぼす影響	40
16. 種々のトウモロコシ栽培体系における水侵食による土壤損失	42
17. パラナ、リオデカンボ集水域における水濁度率の変化（1982-1999）	43
18. ムクナ土壤被覆の有無におけるワタ作中土壤（深さ 3 cm）の温度変化	43
19. 土壤pHに対する有機物の効果	45
20. N肥料90kg有無、慣行耕作（CT）および直播栽培（DS）下のトウモロコシ収量	47
21. ホンジュラス、レンピラスールにおける種々の生産体系の除草剤費	47
22. 種々の耕作法下の土壤の有機物含量	51
23. 管理体系により影響を受けた異なる土壤深度における土壤炭素濃度	51
24. 隔年に一度の作物残渣焼却が土壤炭素蓄積に与える影響	52
25. ブラジル南部において自然植生と比較した直播・被覆作物共存の種々のトウモロコシ生産体系下のCO ₂ 放出および蓄積の評価（8年間の累計）	52
26. ブラジル南部における炭素蓄積積能に関する長期実験	53

写真一覧

1. 土壌に加えられた作物残渣は土壌動物および微生物により分解されて、土壌の有機物含量を増加する。 1
2. シロアリは好みの食物の周囲に生活条件を造る。群落の内部は高度に組織化されている。 6
3. 著しい土壌侵食は土壌微生物の潜在的エネルギー源を取除き、微生物群集ひいては土壌そのものの死に至らしめる。 15
4. 天然林の伐採はしばしば有機物の急速な分解をひき起こす。この砂質土壌はかつて熱帯林を養っていた。 16
5. 残渣の焼却は土地の刈払いに、焼畑農法においても集約的農業生産体系においても、普通に行われる方法である。 17
6. アスマラ周辺地域の放牧地の家畜 18
7. 取除いた作物残渣は土壌生物の餌にはならない。 18
8. 集約的土壌耕起は土地を侵食作用に対し脆弱にする。土壌表面の酸化が増大して有機物が失われ、心土が密になり、緩んだ表土が流出し易くなるからである。 19
9. 雨季に水を集めるため、窪みが掘り下げられている。 21
10. 新たに植えられたアカシア苗の周りで半月状の穴が雨水を捉え貯えている。 25
11. 樹木による遮光によりトウモロコシの生育は準最適であるアグロフォレストリーの区画。 26
12. クエズングアル、アグロフォレストリー、の例 27
13. ニジェールにおける“バッドランド”の植林 28
14. ナイフローラーを用いた作物残渣管理 30
15. 家畜に給餌する農民。 31
16. 魚の廃棄片と集落廃棄物からコンポストをつくる。コンポストプラントは若者の共同により運営される。 32
17. クロカラスムギのマルチによるトウモロコシの直播栽培、ブラジル、サンタカタリナ州。 33
18. レタス畑で働く農民 33
19. 北タイ高地におけるマルチ法 34
20. “フリホールタパド”すなわちトウモロコシ残渣上へのマメ散布：ラテンアメリカで普通の方法。 35
21. コムギ残渣中に直播ドリルしたトウモロコシの実生。 36
22. オーストラリアにおける農場入り口の標識。ここの農民は、無耕起と走行規制の実行性のある組み合わせを創りあげ、土壌中の良好な水分保持容量、よい有機物状況、保証された収穫、期待しうる報いのある農法体系などの結果

を得ている。	36
23. 豪雨直後の表面流去水と土壤損失 マラウィ、ゾンバマウンテン、ナイシ集水域	42
24. 不耕起条件下では、土壤の内部孔隙系は地拵え作業で破壊されることなく雨水を地表から深層（左）へと排水できる。裸地では雨滴の衝撃で表面の孔隙は閉塞され、排水不良となる。	45

表一覧

1. 土壤生物の分類	6
2. 様々の土壤生物（生物相）により営まれる基本的機能	7
3. 耕起がひき起こす急速な有機物分解	19
4. 湿状態が始まる土壤深度と貯蔵水分量差	41
5. 土壤被覆による灌漑水経済、ブラジル セラード	41
6. 石灰施用後同期間における異なる土壤被覆下の土壤断面内石灰の分布範囲	45
7. 土壤が大気CO ₂ の溜めとなるか源となるかを決定する土地利用および土地管理	52

謝 辞

本書はFAOコンサルタントAlexannder BotおよびFAO土地植物栄養サービス(AGLL)技師Jose Benitesによって執筆された。また、下記の方々の貢献があった。

Gunter English, ドイツ; Anthony Juo, テキサスA&M大学, USA; William Payne, ICRISATサヘルセンター、ニジェール; Maria de Fatima, Ribeiro dos Santos, Ademir Calegari, およびFrancisco Skora Neto, Parana州立農業研究所、ブラジル。

さらに下記の方々による貴重な助言に対し謝意を表す。

Parviz Koochafkan, チーフ, AGLL; Sally Bunning 土地管理官AGLL; Juan Jimenez, コンサルタント, AGLL; Alessandro Piccolo, ナポリ大学; Francis Shaxon, コンサルタント; Martin Bwalya, アフリカ保全耕作ネットワーク; Peter Brinn, コンサルタント; Christian Pieri, コンサルタント; Bob Stewart, テキサスA&M大学; Norman Uphoff, コーネル農業開発国際研究所; Rachid Mrabet, 国立農業研究所, 乾燥地栽培センターモロッコ; およびKurt Steiner, ドイツ技術協力庁(GTZ).

本書の執筆に非常に貴重な助力をR.Brinkman, FAOコンサルタント; Telmo Amado, サンタマリア連邦大学, ブラジル; およびDes McGarry, クウィーンズランド州政府, オーストラリア, から戴いた。またこの出版物の作成にあたって著者らはLynette Chalkから効率よく援助して頂いた。

まえがき

健全な土壌は食料体系の基本である。健全な土壌は健全な作物を生み出し、人々の健康を培う基礎である。農業耕作は優しい行為ではないので、健全な土壌を維持するには農民の注意と努力が要求される。いうまでもなく、農耕によって土壌の自然な諸過程は攪乱され、栄養素の放出及び吸収など栄養の循環が影響を受ける。

植物は栄養素をふたつの自然源、すなわち、有機物と無機物から獲得している。有機物は、土に還り分解過程を経てゆく全ての植物および動物遺体を原料としている。有機物は土壌に生息する生物に栄養素と棲家を供給するのみならず、土壌粒子を繋ぎ合わせ団粒とし、土壌の保水性を改善する。多くの土壌は2~10パーセントの有機物を含んでいるに過ぎないが、例え少量であっても、有機物は非常に重要である。

土壌は生きた、ダイナミックな生態系である。健全な土壌中には、顕微鏡的な生物からそれよりも大きな生物が生息し、多くの欠くことのできない機能を働かせつつ、死んで腐ってゆく物質や無機物を植物の栄養に変換している。様々な土壌微生物群は異なる有機基質を餌にしており、それらの生物活性は有機物供給に依存している。

有機物、水、および土壌の間での養分の交換は土壌肥沃度の維持に不可欠であり、持続的な生産目的の為に維持されなければならない。土壌が、有機物と養分含量を回復することなく且つ良好な構造を維持することなく、利用されると、養分循環は破壊され、土壌肥沃度は低下して、農業生態系内部の釣合いが破壊される。

土壌有機物は土壌中の生物的分解の産物であるが一土壌の化学的・物理的な諸性質ひいてはその全体的な健全性に影響する。土壌有機物の組成と分解速度は、土壌構造と孔隙性、土壌透水性と水保持容量、土壌生物の多様性および生物活性、および植物養分の有効性、などに影響を与える。各種の農作業、とりわけ耕起、ディスクハローかけ、および火入れは、土壌有機物の分解を促進して、土壌の風・水侵食を受け易くする。しかし、土壌の健全性を増進し、農業生産性を持続させる代替的管理法がある。保全的農業には、不ないし低耕起法、作物被覆および輪作などによる土壌生態系管理法が含まれている。保全的農業は、土壌表面の残渣、根および土壌有機物の維持、雑草抑制、土壌粒団と大孔隙の増加を促し、ひいては透水性の向上および、表面流や侵食の減少を実現する。そのような条件下で増殖する多様な生物は、病虫害の抑制およびその他生態的諸過程の構成に役立っている。牧草・飼料作物と堆肥肥化を食料および繊維生産と組み合わせる複合作物一家畜体系もまた土壌有機物と土壌の健全性を増進する。本冊子では土壌生産性の改善における有機物の中心的な役割を認め、熱帯における生産的かつ持続的な作物生産のための有機物管理を改善するために有望と思われる技術のあらましを述べている。

土壌有機物含量は有機物（残渣および根）の添加と腐植の分解の関数である。それは土壌の水分、温度および通気、物理的・化学的諸性質と同時に生物的攪乱（土壌動

物による混合)、水による洗脱、腐植の安定化(有機無機複合体と団粒)と関連している。土地利用および管理法もまた土壤有機物に影響を与える。

農業体系は栄養素を求めて土壤を耕起し、作物を反復して収穫し、栄養素を補充し土壤の質を回復するための適当な努力を怠り、土壤有機物レベルを減少させる傾向がある。有機物レベルの衰退は、管理法が改善されるか、休閑期間が自然の生態的過程によって漸進的に回復をもたらすまで、進行する。注意深く選んだ多様な作付体系によって、あるいは良く管理された複合的耕作・家畜体系によって、養分と有機物の供給—除去の釣合いを維持することができる。

農民達は自分の土壤、とりわけ長い間耕作されてきた土壤を維持、改良、再生するためいろいろな行動をとる選択肢を持つ。土壤再生の鍵は、有機物と植物栄養素を保持し、再循環させ、溶脱、流去、侵食により引き起こされる土壤成分の損失を努めて減少させることにある。しかしながら、適当な農法により土壤の質と健全性を回復させるには数年を要する。殊に少ない水分がバイオマス生産と土壤生物活性を減少させる乾燥地域においては然りである。それ故、短期間のうちに土壤有機物形成と水分保持を促し、生産性と農民達にとっての利益を確保する土壤管理法を創出することは有意義なことである。

FAOは、保全型農業により複合的な環境と経済的利益をもって農業部門に重要な貢献ができると認識している。保全農業は、地上・地下部の生物的多様性、生物循環および生物活性を含めて、農業・生態系の健全性を促進する全体的生産管理体系を用いる。これらの体系は、不ないし低耕起法と良く選んだ被覆作物および輪作に基づいた特定の正確な生産標準を適用している。その目的は社会的、生態学的かつ経済学的に持続可能な最適の農業・生態系を構築することである。保全的農業は、農業・生態系の諸過程を効果的に制御することにより、外部的投入を減少し、低投入農業体系をより生産的な体系に転化してゆく機会を与えようとする。土壤生命・生態系機能と人為的攪乱による衝撃との連関をより良く理解することは、負の衝撃を減じ、持続的で生産的農業のため土壤生物活性の利益をより効果的に獲得することを可能にすることになる。

略語リスト

Al	アルミニウム
C	炭素
CEC	陽イオン交換容量
CO ₂	二酸化炭素
Fe	鉄
H	水素
HYV	高収量品種
K	カリウム
Mg	マグネシウム
N	窒素
NaOH	水酸化ナトリウム
NH ₄	アンモニウム
P	燐
S	イオウ
SSA	サブサハラ アフリカ
THM	トリハロメタン

第1章 はじめに

土壌は、有機物含量を基にして鉱物質か有機質に特徴づけられる。

鉱物質土壌は世界の耕地の大半を占め、有機物を微量ないし30%含む。有機質土壌は基本的には気候的な理由により有機物に富んでいる。それらは、30%以上有機物を含み、一般的には重要な耕地土壌ではない。

本書では耕地土壌の有機物の動きを中心に扱い、有機物が不足する状況とそのマイナスの結果を検討する。さらに、より積極的な解決法へ進み、如何にして有機物を増やすことができるかを示すため、いろいろな農法の実例を挙げ、その結果生まれてくる土地と栽培の利益を述べる。

土壌有機物は生きている生物（植物および動物）により作り出され、土壌に戻り分解過程に入るすべての物質を指す（写真1）。それは植物および動物の未分解の元の組織から、腐植として知られる完全に変性した物質の混合物に至る一連の物質から成っている（第1図）。

大部分の土壌有機物は植物組織に由来する。植物組織は60~90%の水分を含む。残りの乾物は、炭素（C）、酸素（O）、水素（H）、および少量のイオウ（S）、窒素（N）、リン（P）、カリウム（K）、カルシウム（Ca）、及びマグネシウム（Mg）からできている。これらの栄養素は少量であっても土壌肥沃度管理の観点からみると大変重要である。

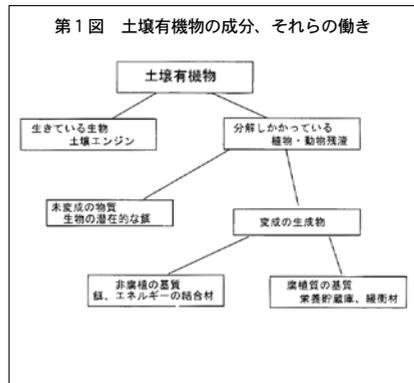
土壌有機物は様々な要素から成っている。それらは、異なった性質と多くの中間段階を持ち、微生物（10~40%）を含む活性的な有機画分と腐植（humus）とも呼ばれる抵抗性もち、安定した有機物（40~60%）を含んでいる。

土壌有機物の形態と分類は、Tate (1987) と Theng (1987) によって記述されてい



写真1

土壌に加えられた作物残渣は土壌動物および微生物により分解されて、土壌の有機物含量を増加する。



る。実際的な目的のためには、有機物は地上部画分と地下部画分に分けられる。地上部有機物は植物残渣と動物残渣であり、地下部有機物は生きた動物群と微生物群、部分的に分解した植物および動物残渣、腐植物質を含む。炭素/窒素 (C:N) 比が物質のタイプと分解のし易さを示すために用いられる。すなわち堅い木質物は高いC:N比を、葉質物より軟らかく壊れ易い物質は低いC:N比を示す。

土壌有機物は便宜的に異なる画分に分けられるが、それらの画分は安定した最終産物ではなく、それらの量は動的な平衡を表している。土壌中における有機物の全量と区分は、土壌の諸性質により影響され、また生態系への植物と動物残渣の年毎に入る量によって影響を受ける。例えば、ある一つの土壌生態系において、土壌有機物の分解・集積の速度は、粒径組成、pH、温度、水分、通気、粘土鉱物組成、土壌生物活性などにより決定される。厄介なことに、土壌有機物そのものがこれら多くの性質に影響しあるいは修正を加える。

土壌表面に新鮮な植物残渣として存在する有機物は、土壌を降雨、風及び太陽の影響から保護する。残渣を取り除いたり、鋤き込んだりあるいは焼却したりすると土壌は好ましくない気候の脅威に曝され、土壌生物から大切なエネルギー源を奪ってしまう。

土壌中の有機物はさまざまな機能を働かせる。実際の農業の観点から見ると、それは二つの主な側面、すなわち(i)“回転する栄養資本”として、また(ii)土壌構造を改善し耕起性を維持し、侵食を最小限にする作用者としてである。

“回転する栄養資本”として、有機物は二つの主要な働きをする。

➤土壌有機物は主に植物残渣に由来するので、必須の植物栄養素を全て含んでいる。従って、蓄積した有機物は植物栄養素の貯蔵庫である。

➤安定した有機物画分(腐植)は植物に利用される形で栄養素を吸収し保持する。

有機物は分解過程で植物に利用される形の栄養素を放出する。この栄養循環系を維持するためには、作物残渣、堆厩肥、その他の源からの有機物供給速度が、分解速度と等しくなければならず、植物による吸収および溶脱や侵食による損失の速度が考慮されなければならない。

添加の速度が分解の速度より低い場合には、土壌有機物は減少する。逆に、添加の速度が分解の速度を上まわると、土壌有機物は増加する。添加速度と分解速度が等しい場合は定常状態にある。

土壌構造の改善に関していえば、活性でいく分の抵抗性をもつ有機物成分は、微生物(特に糸状菌)と共に土壌粒子を結合してより大きな団粒を形成する働きがある。

団粒は良い土壌構造、通気、水浸透および侵食や皮殻形成に対する抵抗性などに重要な役割を担う。

これまで、土壌団粒は全炭素量(Matsonら、1997)や有機炭素レベル(DalaとMayers、1986b)と関連づけられてきた。最近では、壊れ易さ(酸化され易さ)に基

づいて炭素を分画する技術が発達し、それらの炭素の貯蔵プールが土壌の物理的安定性により大きく寄与しており、全炭素の値よりも炭素の動態のより敏感な指標であることが知られるようになった (Lefroy, Blair および Strong, 1993; Blair, Lefroy および Lisle, 1995; Blair および Crocker, 2000)。この壊れ易い炭素画分は土壌の化学的および物理的な性質の指標であることが示されてきた。例えば、この画分は、フェロソル (Ferrosols、赤色粘土質土壌) で、実験室内の模擬的降雨の後、表面皮殻 (Surface crust) 中の0.125mm以下の大きさの団粒百分率測定により、団粒の崩壊を制御する主要な要因であることが示された (Bellら、1998, 1999)。

土壌有機物の抵抗性のある安定的な画分は主として養分の保持容量 (陽イオン交換容量 [CEC]) および土壌の色の源である。有機物のこの画分は非常に緩慢に分解する故、活性のある有機画分よりも土壌肥沃度に影響することは少ない。

第2及び3章は、土壌生物による有機物の変性および土壌中の有機物含量レベルに影響を及ぼす自然の諸要因を取り扱う。第4章は土壌中における有機物集積に影響する様々な管理行為を述べ、第5章では如何にして早魃抵抗性の土壌を造りだすかを検討する。第6章は持続的な食料生産の諸様相を探る。第7章では保全型農業の役割を検討し、第8章では結論を導き出す。

付録1は農業における種々の土壌生物に関する基本的な事柄を説明する。付録2では、生物的、化学的および物理的土壌性質に対する有機物の影響のより詳細なデータを提供する。

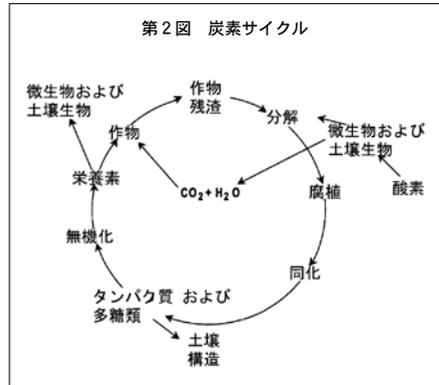
第2章 有機物分解および土壌食物連鎖網

土壌有機物

植物残渣が土壌に還るとき、いろいろな有機化合物は分解過程を経る。分解は物理的崩壊および死んだ物質の複雑な有機分子からより単純な有機および無機分子への生化学的変性を含む生物学的な過程である (Juma, 1998)。植物残渣を引き続いて地表に施用してゆくことが、生物活性と土壌中の炭素サイクルの維持に寄与する。土壌有機物の分解、根の生長と崩壊もまたこれらの過程に係っている。炭素サイクルは、植物、微小および大きな生物により土壌、植物および大気の間で行われる有機および無機化合物の連続的変性過程より構成されている (第2図)。

有機物の分解は自然に起こる生物学的過程である。その速度は三つの主要因により支配されている。：即ち土壌生物、物理的環境およびその有機物の質である (Brussard, 1994)。分解の過程において、いろいろな生成物が放出されてくる：即ち、二酸化炭素 (CO_2)、エネルギー、水、植物栄養素および再合成された有機炭素化合物である。死んだ物質および変性した有機物の連続的な分解によって、腐植 (humus) と呼ばれるより複雑な有機物が生成する (Juma, 1998)。この過程は腐植化 (humification) と呼ばれる。腐植は土壌の諸性質に影響を及ぼす。腐植は徐々に分解しつつ、土壌の色を暗色にし、土壌の粒団化を促し団粒を安定化させる；それに伴って、CEC (養分を引きつけ保持する能力)を増し；N,Pその他の栄養素の保存と供給に与る。

土壌生物は、微生物を含めて、土壌有機物を餌として利用する。それらが土壌有機物を砕く過程で、過剰な養分 (N, PおよびS) は土壌中に植物が利用できる形で放出される。この過程は無機化と呼ばれる。微生物により生産された廃棄物もやはり土壌有機物である。この廃棄物質は元の植物及び動物物質よりも分解されにくくはあるが、さらに沢山の生物により利用される。炭素の構造を破壊し新しい構造を生産しあるいはそのCを彼ら自身の生体内に貯えることにより、土壌生物相は養分循環過程において、特に、作物生産に十分な養分を供給する過程において、最も重要な役割を演じている。有機物含量、特に安定性の高い腐植は、水を保持し、大気からCを取り込む容量器を増大させる。



土壌食物連鎖網 (Soil food web)

土壌生態系は、空気、水、鉱物、有機物、大・小生物より構成され相互に依存する生命維体系と定義することができる (ボックス 1)。

それら構成成分の全てが共同して機能し、緊密に働き合っている。

生物群とそれらの相互作用は多くの土壌生態系の機能を増進し土壌食物の連鎖網を作りあげている。

全ての食物連鎖網に必要なエネルギーは、一次生産者：すなわち植物、地衣類、苔類、光合成細菌、および藻類など日光を用いて大気からのCO₂を炭水化物に変換する生物、により生成される。その他の大部分の生物は自らのエネルギーと栄養を一次生産者に依存しており消費者と呼ばれる。

土壌の生命は農業生産に対する栄養と水の有効性を決定する多くの自然過程で、主要な役割を演じている。すべての生きている生物の基本的活動は生長と増殖である。生長している根と植物残渣からの副産物は土壌生物を養うのであるが、土壌生物の側からみると、有機物を分解し栄養素を循環させ、土壌構造を増し、土壌生物の数を調節することで、植物の健康を維持する。但し、土壌生物の中には、作物生産の観点からすると有益なものも有害なもの (害虫および病原菌など) も含まれることは言うまでもない。

土壌有機物の生きている部分にはバクテリア、ウィルス、糸状菌、原生動物、および藻類のような広範な微生物が含まれる。また、植物根、昆虫、ミミズ、およびさらに大きい、モグラ、ネズミ、ウサギなど土壌中で生活の一部を過ごす動物なども含まれる。生きている部分は全土壌有機物の凡そ5パーセントに当たる。微生物、ミミズおよび昆虫は作物残渣や堆肥を餌として消化する際にそれらを破碎し、土壌中で鉱物と混合し、エネルギーと栄養素の循環を助けている。ミミズの皮膚上の粘着性の物質や、糸状菌やバクテリアが造る粘着性の物質は粒子の結合を助ける。ミミズの糞はまた、有機物と土壌無機物質を混合する結果、周囲の土壌よりも強い集合体を造りだす。ミミズの内臓の粘液も同様の働きをする。このように、土壌の生きている成分は空気と水を有効に保ち、植物栄養を供給し、汚染物質を分解し、土壌構造を維持する働きを担っている。

土壌生物の組成は餌源 (それはまた季節にも依存しているが) に依存している。従って、生物は、土壌中に一様に分布しているのではなく、また年間を通じて一様に分布しているのでもない。しかしながら、ある場合には、生物起源の構造は残されている。それぞれの種および群は、適当な餌、空間、栄養素、および湿度がある場所を選んで

ボックス 1 健全な土壌生態系の機能

健全な土壌生態系の機能

- 有機物を腐植へ分解する。
- N その他の栄養素を保持する。
- 土壌粒子を最適な構造に結合する。
- 根を病害および寄生生物から護る。
- 貯蔵栄養素を植物に利用できるようにする。
- 植物の生長を助けるホルモンを生産する。
- 水を保持する。



写真2
シロアリは好みの食物の周囲に生活条件を造る。群落の内部は高度に組織化されている。

る。餌が得られるかどうかは土壌生物の活性レベルに影響する重要な因子であり、それは土地利用および管理に関わっている（第3図）。

土壌生物の数と活性を増加する農耕法は、不ないし低耕起や、植物の維持、土壌生物とその生息環境の攪乱を減らし餌を十分与える作物残渣の残留などを含んでいる。

土壌中のいろいろな生物群のグループ分けができる（Brussard, Juma, 1995）。第1表はそれらを大きさで分け、第2表は機能で分けている。

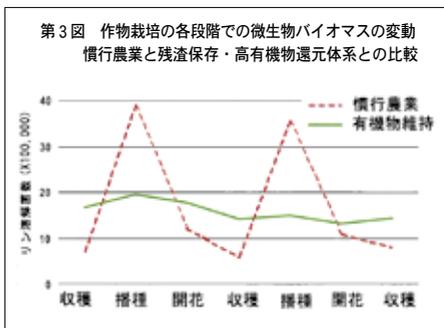
第1表 土壌生物の分類

微小生物	微小植物	< 5 μm	細菌系状菌
	微小動物	< 100 μm	原生動物 線虫
大生物	中型生物	100 μm - 2 mm	トビムシ ダニ
	大型生物	2 - 20 mm	ミミズ ヤスデ ダンゴムシ カタツムリ、ナメクジ
植物	藻類	10 μm	
	根	> 10 μm	

注：粘土粒子は2 μm 以下
出所：Swift, Heal and Anderson, 1979. ----

棲んでいる（写真2）。生物は有機物があるところにはどこにでもいる（Ingham, 2000）。従って、土壌生物が集中しているところは：根の周囲、落葉枝の中、腐植の中、土壌粒団の表面、および団粒間の空間、などである。同じ理由で、土壌生物は森林および地表にバイオマスが多量に残る栽培体系に最も豊富に棲んでいる。

土壌生物の活性は、季節的はもちろん日中変動にも従う。しかしすべての生物が同時に活動的というわけではない。多くの生物はただ生きているか休眠してい



Source: Balota, 1996

分解の過程

新鮮な残渣は死んだばかりの土壌微生物、昆虫およびミミズ、古い植物根、作物残渣、および最近施用された堆肥などである。

作物残渣は主として、細胞壁（セルロース、ヘミセルロース、等）由来の複雑な炭素化合物を含んでいる。炭素原子と他の炭素とを結ぶ炭素の鎖は有機分子の“骨格”となっている。これらの炭素鎖は、種々の量の酸素、水素、

窒素、リンおよびイオウを伴い、単純な糖、アミノ酸およびより複雑な長鎖あるいは環状の炭素鎖を持つ分子となる。

それらの化学的構造に基づいて、分解は速かったり（糖、デンプンおよびタンパク質）、遅かったり（セルロース、脂肪、ワックスおよび樹脂）あるいは非常に遅かったり（リグニン）する。土壌中の分解過程で、微小生物は新鮮残渣の炭素構造を変性した炭素生成物に変性する。

土壌中には、沢山の異なった種類の有機分子がある。あるものは、植物あるいは他の生きている生物から直接合成された単純な分子である。これらの比較的単純な化学物質、例えば糖、アミノ酸、およびセルロースなどは多くの生物によって直ちに消費される。

第2表 様々の土壌生物（生物相）により営まれる基本的機能

機能	関与する生物
土壌構造の維持	掘削する無脊椎動物と植物根、菌根菌およびその他の微小生物
土壌の水文学的過程の調節	知どの掘削する無脊椎動物と植物根
ガス交換と酸素の供給 (土壌中への貯蔵)	通例では微小生物、植物根、腐分は大きく密な生物起源無脊椎動物 住居中に保護された虫類
土壌の無氧化作用	通例では微小生物
栄養循環	通例では微小生物と植物根、若干の土壌一および沼澤様無脊椎動物
有機物の分解	種々の腐生および沼澤様食性無脊椎動物（除糞物食動物）、糸状菌、細菌、放線菌その他の微小生物
病虫害、寄生虫、病害の抑制	植物、菌根菌およびその他の糸状菌、線虫、細菌および種々のその他の微小生物、トビムシ、ミミズ、種々の捕食者
資料、家の起源	植物、種々の腐生（コオロギ、甲虫の幼虫、アリ、ダニ）、ミミズ、管棲動物、微小生物およびそれらの副産物
植物と根の共生、根粒の形成	根粒菌、菌根菌、放線菌、窒素ガス代謝細菌、その他の根圏微生物、アリ
植物生長の調節（正および負）	遊離動物、植物根、根粒菌、菌根菌、放線菌、病原菌、植物寄生性線虫、食糧性昆虫 植物生長促進性根圏微生物、生分解菌 根粒菌類、知どの土壌生物

それ故、それらは土壌中に永くは残留できない。他の化学物質、例えば樹脂、ワックスが直接植物から由来するが、土壌生物が分解することはより困難である。

腐植が一連の有機物分解過程の結果生成する。腐植物質はその複雑な構造のため多くの微小生物によってエネルギー源として利用されず、土壌中に長期に亘り残留する。

非腐植物質 (non-humic substances) : 意味と機能

非腐植有機分子は新鮮な残渣の細胞から直接放出されるタンパク質、アミノ酸、糖およびデンプン等である。土壌有機物のこの部分は活性的すなわち容易に分解する画分である。この活性画分は、気象条件、土壌の水分状態、植生の生育段階、有機残渣の添加および耕起等の人為活動により強く影響を受ける。非腐植物質は土壌中では様々な生物の主要な餌の供給源である。

炭水化物は土壌中では三つの主要な形態をとっている。すなわち：土壌溶液中の糖、セルロースおよびヘミセルロース；複雑な多糖類；および種々の大きさや形の高分子で強く粘土鉱物あるいは腐植物質に結合したものの、である (Stevenson, 1994)。

単純な糖、セルロースおよびヘミセルロースは多くの土壌有機物の5~25%を占め、微生物により容易に分解される。

多糖類（糖タイプの分子が繰り返し連結して長鎖になったもの）は、鉱物質粒子を安定した粒団に結合する能力があるためよい土壌構造を形成する助けとなる。研究は、軽い多糖類分子よりも重い粒子のほうが粒団安定性と透水性促進に重要であるらしいことを示している (ElliotとLynch, 1984)。ある糖類は種子発芽あるいは根伸長を促す。多糖類が影響するその他の土壌性質には、CEC、陰イオン保持、生物活性などがある。

土壌脂質は非常に広範な物質群を含み、その内で、脂肪、ワックス、樹脂は土壌有機物の2~6%に当る。脂質の重要性は、そのあるものが生長ホルモンとして働く能力があることによる。他のものは植物生育に抑制効果を及ぼす可能性がある。

土壌窒素は主として (90%以上)、アミノ酸、核酸およびアミノ糖として、有機物の形態をとっている。少量がアミン、ビタミン、農薬およびそれらの分解生成物等として存在する。残りは、アンモニウム (NH_4) として存在し、粘土鉱物に保持されている。

腐植 (humus) の組成と機能

腐植すなわち腐植化した有機物は、多くの様々な土壌生物により利用され、変性された有機物の残りの部分である。それは、腐植酸、フルボ酸、ヒマトメラン酸およびヒュミンにより構成される比較的安定した成分である (Tan, 1994)。

腐植は恐らく、陸上および水域環境において最も広く分布する有機炭素含有物質である。腐植は、土壌無機質相と密接な相互作用を持ち、殆どの生物が利用するには化学的に複雑すぎるので、容易には分解されない (ボックス2)。

腐植物質の最も顕著な特徴は、金属イオン、酸化物、水酸化物、無機および有機化合物と作用しあって、水溶性あるいは不溶性複合体を形成する能力である。これらの化合物の生成により、腐植物質は土壌および水中の金属と有機

ボックス2 腐植物質は必要に応じて植物に供給できる栄養を保持する。

腐植の機能：

- 肥料効果の改善；
- 長命 N-源は 60-80 日永く効く；
- 栄養素、特に P と Ca の吸収改善；
- 有用土壌生命への刺激；
- 栄養効果を増し病虫害、霜凍害を減らす；
- 塩害管理—腐植が過剰ナトリウムから植物を“緩衝”する；
- 腐植が土壌 C レベル増加の触媒となる。

物を溶解し、可動化して土壌中のある層へと移動させることができる。この働きは、栄養素類特に微小濃度にもみあるそれらの栄養素の有効性に影響する (Schnitzer, 1986)。それらの複合体の集積は毒性、殊に酸性土壌中のアルミニウム (Al) (Tan と Binger, 1986) の毒性を軽減し、あるいは汚染物質—アトラジン等の除草剤あるいはテフルトリン等の殺虫剤—を腐植物質の空洞中に捕捉して軽減する (Vermeer, 1996) のに寄与すると言われる。

腐植およびフルボ質物は、生理学的および栄養的効果により直接植物生育を増進する。これらの物質のあるものは自然の植物ホルモン (オーキシシンおよびジベレリン類) として働き、発芽、発根、植物栄養吸収を促進し、N、P および S 源として役立っている (Tan, 1994; Schnitzer, 1986)。間接的には、それらは土壌の物理的、化学的および生物学的性質の改良を通して植物生育に影響し、例えば、土壌の含水量および CEC を増加させ、良い土壌構造を通して易耕性と通気を改善する (Stevenson, 1994)。

有機物の生きていない部分のうち約35~55%が腐植である。それは重要な緩衝材として、土壌酸性度および栄養の有効性の変動を抑制している。単純な有機物と比較して、腐植物質は非常に複雑であり、大きく、高い分子量を持っている。有機物の良く分解した部分である腐植の特徴は、単純な有機分子とは全く異なっている。それらの一般的な化学的組成は良く知られているが、いろいろな腐植物質タイプの植物生育に対する相対的な重要性については、さらに解明が求められる。

腐植は次の成分から成っている：

- ▶フルボ酸 (fulvic acids)：腐植のうち、全pH領域で水溶性の画分である。その色は通常淡黄ないし黄褐色である。
- ▶腐植酸 (humic acids)：腐植のうち、pH2以上の条件を除いて、水溶性の画分である。普通の色は暗褐色ないし黒である。
- ▶ヒューミン (humins)：腐植のうち、いかなるpHでも溶解せず、水酸化ナトリウム (NaOH) のような強いアルカリでも抽出されない画分で通常黒色である。

酸という述語が腐植物質に使われているのは、それらが弱い酸であることを意味する。

フルボ酸と腐植酸は、大分子量の複雑な混合物である。腐植酸はフルボ酸より大きいと考える人もいる。上述のように、それらは水溶性に基づいて異なる物質群が互いに分離されている。

フルボ酸は腐植生成の比較的初期に形成される。土壌中における腐植酸とフルボ酸の相対的な量は土壌タイプや管理法により変わる。森林の腐植は高いフルボ酸含量という特徴を持つのに対して、農耕地や草地の腐植はより腐植酸に富んでいる。

第3章 有機物含量に影響する自然要因

土壌有機物プール内部における物質の変性と動きは動的な過程であり、気候条件、土壌タイプ、および土壌生物によって影響される。これら全ての要因は階層的で空間的な大きさの範囲内で働く。土壌微生物は多量栄養素および微量栄養素の両方の分離と循環に関与し、その活性は土壌の構造、易耕性および生産性に影響する。

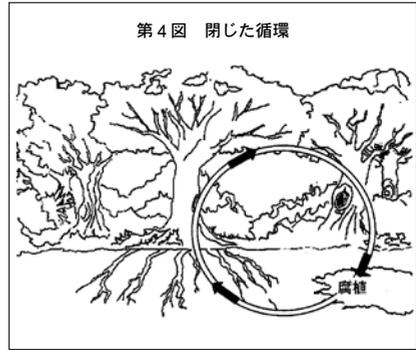
人為的攪乱のない自然の湿潤および半湿潤森林生態系では、生きている成分と死んだ成分は互いに動的な平衡にある（第4図）。

いろいろな樹冠で高いバイオマス生産の下にある土壌表面上の落葉落枝（litter）は、土壌中および土壌表面において、一般的に高い生物学的活性をもつようになる。MollisonとSlay（1991）は次の五つの機構を区別している：

- ▶ 生きている植物という連続的な土壌被（soil cover）が、土壌構成と相俟って、雨水の捕捉と浸透を促がし土壌を保護していること。
- ▶ 分解しつつある葉の落葉落枝層が大および微生物群に連続的なエネルギー源を提供していること。
- ▶ 土壌中で異なる深さに分布するいろいろな植物根が養分の効果的な吸収を可能にし、微生物（と根）の活発な相互作用を可能にしていること。
- ▶ 微生物による栄養素放出の主な期間が植物による養分要求の主な期間と一致していること。
- ▶ 深根性植物（deep-rooting plants）、土壌中の大および微小動物相による栄養の再循環。

この平衡は土壌とその場の条件に適応した植生のために殆ど閉鎖した循環を創り上げ、植物生育にとって殆ど完全な物理的・水文的条件（hydric conditons）、例えば涼しい微気候、高い蒸発散（evapotranspirations）、良い孔隙性（porosity）、十分な湿りを備えた良い根張り条件、などを産み出す。これは水浸透を促し、侵食（erosion）や表面流去（run off）を防止する。このようにして、それは、当該地域から出る流水を清浄に保ち、年間を通じて流量の変動を比較的滑らかにし、地下水の再充填を可能にする。

人間が管理する系においては、土壌の生物学的活性は土地利用や植物の型および管理行為によって左右される。第4章では管理行為の影響を概観する。土壌生物相の活



性を左右する環境および栽培要因、有機物の蓄積と分解の間の均衡、について以下に述べる。

温度

幾つかの研究は、温度が植物残渣の分解速度を左右する基本的な要因であることを示している。分解は通常温帯地域よりも熱帯地域でより速く進む。LaddとAmato(1985)は、植物材料や気候型の違いに関わりなく、南オーストラリアにおけるマメ科材料の分解が、時間尺度は異なるものの、ナイジェリアと連合王国(UK)におけるライグラスのそれと同じパターンに従うことを明らかにした。熱帯における連続的な高温によりもたらされた比較的速い分解速度は、熱帯農業-生態系においては、有機物の高い平衡レベルを達成することが困難であることを意味している。従って、耕作土壌に多くの有効な有機物を維持するためには毎年の多くの有機物の投入が必要となる。より低温の地域の土壌では、無機化(分解)速度が遅いため、より多くの有機物を含む。

土壌水分および水飽和

土壌有機物レベルは普通平均降水量(precipitation)が増加するにつれて増大する。土壌水分が高レベルの条件では、バイオマス生産が高くなり、残渣が多く供給され、土壌生物相への餌の潜在的レベルも高くなる。

土壌の生物学的活性は空気と水分を必要とする。最適微生物活性は、孔隙空間の60%飽水に相当する“圃場容水量(field capacity)”近くで起こる(LinnとDoran, 1984)。

他方、水飽和の期間には通気が不良となる。大抵の土壌微生物は酸素を必要とし、それ故、土壌中で酸素が減少すると、これらの微生物は不活性になるか死ぬため、無機化速度は減少する。若干の変性過程は嫌氣的になるので、廃棄産物あるいは病原性微生物に好都合な条件による植物根への障害が引き起こされたりする。水停滞の長引く期間中には、引き続き生産と遅滞する分解により土壌中で非常に多量の有機物が集積してくる(例、泥炭土およびインドの茶園)。

超湿潤地域は別として、湿潤、半湿潤および半乾燥熱帯の広範な地域の気候は明瞭な湿潤および乾燥季により特徴づけられている。湿乾熱帯においては、大部分の硝酸はしばしば土壌表面で雨季の最初に生じる(Greenland, 1958; Mueller-Harvey, JuoおよびWild, 1989)。この微生物活性の増大により起った窒素無機化は、最初の少しの雨で壊れ易い土壌有機物が利用される結果である。

焼畑農業(slush and burn)を行っている農民は、しばしばこの豊富な無機態窒素を溶脱と表面流去により失われる前に利用するため、早期に植え付けを始める。これらの低投入系では、雨季の初期に土壌中に存在する硝酸量は土壌の有機物含量に緊

密に関係している。窒素の有効性は雨季後期には減少してしまう。

粒径組成 (soil texture)

土壌有機物は粘土含量が増加するに伴い増加する傾向がある。この増加は二つの機構によっている。第一に、粘土粒子と有機物間の結合が分解速度を減少させるためである。第二に、粘土含量の高い土壌は団粒形成を増加するためである。大団粒は物理的に有機物を微生物の攻撃でおこる更なる無機化から保護するのである (Rice, 2002)。例えば、ミミズがふんをし、それに含まれる大団粒がいくつかの要因の結びついた要因 (気候、植物生育および他の生物) により破壊される場合、栄養素が開放されて他の土壌微生物成分に利用されるようになる。

同じ気候条件下では、微細な粒径組成 (粘土質) の土壌の有機物含量は、粗い粒径組成 (砂質) の土壌のそれの二ないし四倍ある。

多くの熱帯の陸生土壌中で主な粘土鉱物であるカオリナイトは、他の粘土鉱物に比べて、遥かに低い比表面積および養分交換容量を持っている。それ故、カオリナイト質土壌では粘土-腐植複合体 (clay-humus complexes) の割合が著しく低い。その上、適当な土壌湿度条件では、保護されていない易分解性腐植物質は分解に対し脆いのである。このように、気候および土壌条件が分解に好都合であるので、湿-乾熱帯の耕作されているカオリナイト質土壌では有機物レベルを高く維持することは困難である。対照的に、鉄およびアルミニウム酸化物に富む土壌では、有機物は有機-酸化物複合体として残ることができる。そのような性質は、微細粒径組成をもち、酸化物に富み、高塩基状態の多くの熱帯土壌に典型的な、土壌微小団粒の形成に好都合である (Uehara と Gilman, 1981)。これらの土壌は、自然植生下では低仮比重 (bulk density)、高微細孔隙量および有機物含量で知られているが、同時に作物生産に用いられる場合には酸化物による高いリン酸固定容量 (phosphate fixation capacity) をもつことでも知られている。現在の知見では、有機物はバーチソル (Vertisols) の暗色に寄与していることが知られているが (Coulombe, Dixon と Wilding, 1996)、それらの土壌生成、および土壌構造の耐久性すなわち弾力性を決定する上では重要ではないと考えられている (McGarry, 1996)。バーチソルにおいては、有機物含量は高くはならず、10g/kg 程度のものである (Coulombe, Dixon と Wilding, 1996)。

母材も、その土壌構造への影響を通してのみではなく、有機物集積に影響を与える。玄武岩のような本来養分豊富な材料から生成してきた土壌は、花崗岩のような無機栄養素に乏しい材料から発達した土壌よりも、より肥沃である。その上、前者は植物の生長が大きいためにより有機物集積が進む傾向がある。

地形 (topography)

有機物集積はしばしば丘陵地帯下部で有利である。この集積には二つの理由があ

る：すなわち、土壌条件が中間または頂上部よりも湿っている。また、有機物が、表面流水および侵食により、景観の低部へと運ばれて来る。同様に、有機物レベルは、北側斜面（北半球では）において低温のため、南側斜面（および南半球では反対）と比較して、高い傾向がある（Quideau, 2002）。

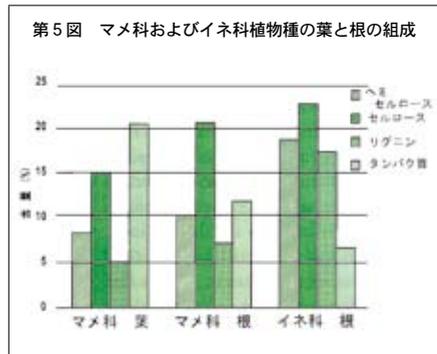
塩分濃度（salinity）および酸性度（acidity）

塩分、毒性および極端な土壌pH（酸性またはアルカリ性）はバイオマスを乏しくし、その結果、土壌への有機物供給を減少させる。例えば、pHは二つの方向で土壌の腐植形成に影響する：分解およびバイオマス生産である。酸性あるいはアルカリ性の強い土壌では、微生物の生育環境は厳しく、有機物の微生物的酸化レベルが低下する（Primavesi, 1984）。土壌酸性は、植物栄養の有効性に影響し、そのため間接的にバイオマス生産と土壌生物相への有効な餌の供給を左右する。糸状菌は、細菌ほどには酸性土壌条件に対し、敏感ではない。

植生（vegetation）およびバイオマス生産（biomass production）

土壌有機物集積の速度は入ってくる有機物の量と質に大いに依存している。熱帯条件下では、緑肥やマメ科植被作物のようなC:N比が低く速やかに分解する材料の供給は分解に好都合であり、その生育期間中に短期間で無機化しやすい窒素源を増加させる。他方、穀物わらあるいはイネ科草本のように（第5図）、C:N比が高くリグニン含量に富む植物材料の供給は、一般に養分の固定、有機物の蓄積および腐植形成に好都合で、土壌構造の発達を改善する可能性を高める。

リグニンやポリフェノールのような植物成分は分解を遅らせる。土壌有機物蓄積に対する管理の影響を比較する為に行われた南部ナイジェリアにおける実験では、リグニン含量の高いギニアグラス（*Panicum maximum*）を生やし三年間休閑した区画は炭素レベルが森林休閑下のそれに匹敵する水準を維持した。しかしながら、ヒヨコマメ（*Cajanus cajan*）のようなマメ科植生下で休閑した場合は土壌全炭素を著しく減少させた（JuoとLal, 1977）。



Source: Primavesi, 1984

PalmとSanchez（1990）は、三種のマメ科植物（*Inga edulis*, *Cajanus cajan*および*Erythrina*種）の分解速度および窒素無機化パターンが、葉のリグニンおよびポリフェノール含量に関連していると報告した。*Erythrina*の葉はポリフェノール化合物

濃度が最も低く、研究した三種のうちでは分解速度が最速であった。

根の生成分解もまた土壌中への重要な腐植添加の一部を構成し、従って炭素蓄積に重要である。森林では、殆どの有機物は表面の落葉落枝として加わる。しかし、草地では、有機物の三分の二までが根の分解物として加えられる (Quideau, 2002)。

第4章 有機物含量に影響する人為

土壤有機物に影響する人為的攪乱 (human intervention)

種々の人間活動が有機物含量および生物学的活性を減少させる。それ故、土壤の有機物含量の増加あるいは良いレベルを維持することでさえ、有機物を土壤に還元することや高残渣 (high residue) 作物あるいは深一または密根 (deep-or dense-rooting) 作物の輪作を含む持続的な努力が必要とされる。粗砂のような通気性の良い土壤あるいは暖一暑および乾地域の土壤の有機物含量を上げることは、投入した材料が速やかに分解するため、特に困難である。土壤有機物レベルは、寒冷地域あるいは湿一潤地域の細かい粒径組成で通気が制限される土壤においては、少ない有機物残渣によっても維持することが可能である。

土壤有機物を減少させる行為

どんな形の人為的干渉でも土壤生物の活性に影響を及ぼし (CurryとGood, 1992)、その結果として系の平衡に影響を与える。耕起の反復や植生の焼却といった土壤生物の生活および栄養条件を変えるような管理行為はその微環境の劣化を惹き起こす。これは、バイオマスと多様性の双方で土壤生物相の減少の衰退を導く。土壤有機物を分解する生物がいなくなると、土壤構造は、雨、風および太陽によって破壊される。この結果雨水表面流去と侵食をひき起こし (写真3)、生物のための潜在的な餌、すなわち表土の有機物を除去してしまう。それ故、土壤生物は土壤の最も大切な性質であり、“生物相が無くなったとき、大地の最表層は土壤であることを止める” (Lal, 1991)。

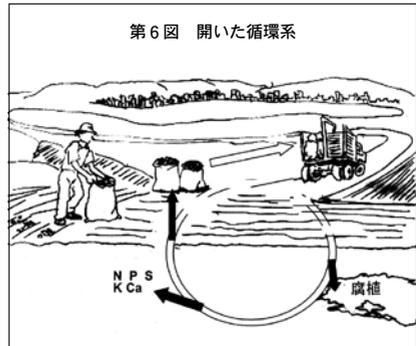
ある開いた循環系 (第6図) において土壤有機物の減少へ導く諸要因は結果により次のように分けられる：

- ◀バイオマス生産の減少；
- ◀有機物供給の減少；



写真3

著しい土壌侵食は土壤微生物の潜在的エネルギー源を去除し、微生物群集ひいては土壤そのものの死に至らしめる。

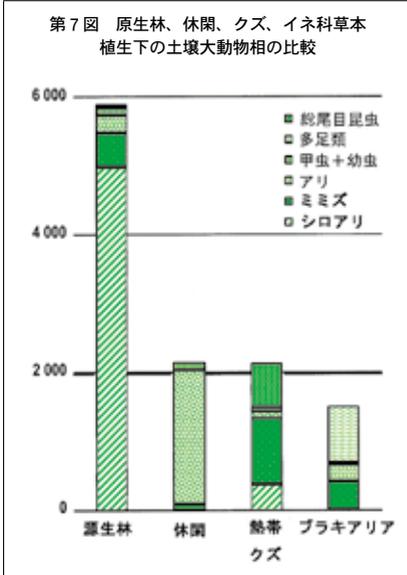


分解速度の増加。

バイオマス生産の減少

永年植生 (perennial vegetation) の転換

農業のために森林を伐採することの結果は、落葉落枝層の消失であり、土壌生物の数と多様性の減少を伴う。一方、多くの温帯森林種はよく草地に適応するようにみえるのに対して (CurryとGood, 1992)、熱帯における森林伐採の影響はより深刻である (写真4)。



Source: Van der Werff, 1990



写真4

天然林の伐採はしばしば有機物の急速な分解をひき起こす。この砂質土壌はかつて熱帯林を養っていた。

研究によると、土壌生物の多様性が失われるに伴い、適応種が土着種に替わって占拠し種構成は著しく変わる可能性がある。

ペルーアマゾンでは、土壌大動物相のバイオマスと生息密度は、耕起区では原生林と比較して、それぞれ6および17パーセントであった (LavelleとPashanasi, 1989)。

スリナムでは、原生林に較べて、平方メートル当りの動物数は36パーセントに、種の多様性は28パーセントに低下した (Van der Werff, 1990)。土着種は殆ど消え失せ、適応種が定住した (第7図)。

混合植生 (mixed vegetation) の作物単作 (mono culture) および草地への転換

草地と単作生産系の下における植生の単純化と落葉落枝層の消失は、動物相の多様性の減少へと導く。根系 (殊にイネ科草本) は大規模で、土壌中で広域にわたる可能性があるが、単作作物の根分泌物は限定された異種微生物だけを優占させ、その結果捕食者の多様性にも影響すると思われる。より日和見的な病原菌種 (opportunistic pathogens) が、作物近くに空間を獲得して障害を起こす可能性もある。連続的耕作および放牧は土壌表面の緊密化をもたらし、空気の循環に影響を与える。土壌中の嫌气的条件は種々の微生物の生育を刺激

し、より一層病原性の生物の増殖を促す。

高収量指標 (high harvest index)

緑の革命の結果のひとつは、高収量品種 (HYV) で土着品種を置換えたことである。これら HYV は、地域的に発達してきた品種と較べて、より穀粒が多く、藁が少なく、その結果作物の収穫指数 (穀粒：全地上植物質量) が増加した。生産の観点からは、これは論理的な方法であった。しかし保全の観点からは好ましくはない。作物残渣が減少すると、収穫後の土壌被覆および有機物、または家畜の餌 (のちには厩肥となる) に残る分が減少する。また、動物を残渣で放牧するところでは、保全目的の為の残りはいっそう少なくなった。

休閑裸地 (bare fallow) の利用

慣行的には、休閑期間が作物生産期の後に、土地に“休み”を与え、生産性を回復させるために、使われる。通常それは養分を引き出し土壌生物相を著しく改変した生産系、例えば焼畑系あるいは耕起系において必要である。

農民らは自分の土地を再生するために休閑裸地を用いる。しかしながら、自発的な雑草生育は別として、これは土地に土壌生物相のエネルギー源がなくなることを意味する。土壌の食物連鎖を回復する代わりに、土壌有機物はさらに減退するので、土壌被覆が無い場合、乾季の後に雨季が始まると著しい侵食と表面流去をひき起こす可能性がある。

有機物供給の減少

自然植生および作物残渣の焼却

畑のトウモロコシ、コメおよびその他の作物残渣を焼却することは普通におこなわれている (写真 5)。残渣は通常、害虫あるいは病気の制御を助けあるいは次期の圃場作業をやり易くするために、燃されている。焼却は落葉落枝層を破壊し、その結果土壌に還元される有機物量を減らす。その結果表面土壌および落葉落枝層に生息する生物も除去される。将来起こるべき分解のためには、植物栄養が放出される前に先ず微生物社会を構築するためのエネルギーが投入されなければならない。同様に、休閑地および藪が耕起の前に焼かれる。これは急速なリン酸の供給をひき起こし、種子発



写真 5

残渣の焼却は土地の刈払いに、焼畑農法においても集約的農業生産体系においても、普通に行われる方法である。

芽を刺激する。しかし、これに伴う栄養、有機物および土壌生物活性の損失は厳しい長期的結果を伴う。

過放牧 (overgrazing)

世界中で、扶養能力以上に過放牧をする傾向がある。牛、荷車用動物および反芻動物が共有放牧地および道路わき、河川堤防およびその他の公共地で放牧されている(写真6)。過放牧は混生する植物のうち最もおいしく有用な種を減らし、植被を減じて、それに伴う侵食害を増加させ、土地の栄養価と扶養能力を減退させる。



写真6 アスマラ周辺地域の放牧地の家畜

作物残渣の除去

多くの農民は、家畜の餌や敷き物に使うため、あるいはコンポストを作るために、圃場から残渣を持ち出す(写真7)。これらの残渣は後になって厩肥あるいはコンポストとして、ふたたび土壌肥沃度に貢献する。しかし、残渣は時として圃場から持ち去られ、二度と戻されることはない。このような植物残渣の持ち出しを行うと、もはや残渣中にある植物栄養素が再循環する機会は失われてしまう。



写真7

取除いた作物残渣は土壌生物の餌にはならない。

分解速度の加速

耕作 (tillage practices)

耕起は土壌中の有機物を減らす主要な作業である。土壌は耕される毎に通気される。有機物の分解と炭素(C)の放出は好氣的な過程で起るので、酸素は有機物を餌とする土壌微生物の働きを刺激し加速する。この意味するところは：

- ❖ 鋤かれた時、残渣は土壌中に空気と共に取り込まれ、多くの微生物と接触するので炭素循環を促進する。分解は迅速であり安定性のより低い有機成分の形成と大気中へのCO₂放出の増大とをひき起こす。このようにして有機物減少に至る。
- ❖ 土壌表面に残される残渣は、微生物への曝露が少ないので炭素循環を遅らせ緩やかにする。このため安定した腐植の形成が促され、大気へのCO₂放出が遅らされる。

短期の有機物損失に関しては、土壌が耕起されればされるほど有機物は分解される

第3表 耕起がひき起こす急速な有機物分解

耕起の型	19日間で失われた有機物 (kg/ha)
モルドボードフラウト ディスクハロウ (X2)	4 300
モルドボードフラウ	2 230
ディスクフラウ	1 840
チゼルフラウ	1 720
直播	860

Source: Glanz, 1995

(第3表)。さらに、繰り返し毎年行われる耕作による、長期的損失がある。残渣を僅かしか土壤へ還元しない作付体系はこの減少を加速する。多くの近代的作付体系では頻繁な耕起と少量の残渣（還元）が組み合わさっている結果、多くの土壤において土壤有機物含量の減少をひき起こしている。

歴史的には、農場家畜からの厩肥の施用が普通におこなわれ、それが耕起の反復および残渣の低還元にも拘わらず、有機物レベルを維持する主要な手法であった。しかし農場での機械化が進むにつれて、家畜数が減り、有機物源が顕著に減少した。

有機物の生産と保全是、通常の耕作法に劇的な影響を受け、これが有機物を減らしたのみでなく、風や水による侵食の可能性をも増加させたのである（写真8）。

この衝撃は多くの筋道で起こる：

- ◀ 耕起が、雨水の衝撃を和らげる筈の残渣を地表に残さない。
- ◀ 耕起が、ミミズなどの餌の量を減らし穴や空隙を減らし、その結果ある種の生物の数が著しく減少する。その上ミミズ数の減少は、穴あけによる空隙および通気（特に連続する大孔隙による）の増加の効果を減らし、有機物の速やかな分解を促す筈の植物残渣の埋込や取り込みの能力を低下させる。
- ◀ 鋤やディスクにより繰り返し耕すと、表面を平滑にし、自然の土壤団粒および表面と心土を繋ぐ回路を破壊するので土壤を侵食され易くする。大孔隙は慣行的耕作により壊されるが、それらは降雨に際し水を土壤中に導入するために必要なのである。
- ◀ 鋤盤（plough pan）あるいはホー盤（hoe pan）、すなわち鋤やホーの底で擦りつける作用により生ずる緊密な土壤層、は根の貫入および水浸透を妨げる可能性がある。
- ◀ 乾燥条件下の鋤あるいはディスクかけは土壤を粉碎し、容易に表面皮殻を作らせて、表面流去および侵食を招く。このため、土壤表面の粗さが減退し、豪雨の際の雨水の一時的貯留機能を弱め悪化させる。
- ◀ 嵐の間の表面流去は、土壤に留って植物に利用されるはずの水浸透を妨げるため、後期に早魃ストレスの可能性を高める可能性がある。



写真8

集約的土壤耕起は土地を侵食作用に対し脆弱にする。土壤表面の酸化が増大して有機物が失われ、心土が密になり、緩んだ表土が流出し易くなるからである。

ある状況の下では、土壤生物に不均衡を生じたり、土壤構造の形成過程を妨げる可能性がある。例えば、コメ圃場あるいは牧草地におけるある種のみみずに対する影響の例がある。

排水（drainage）

通気不良の土壤では、通気の良い土壤と比べ酸素が不足または欠乏するため、有機物の分解が緩慢になる。土壤排水は地形により強く支配される。丘陵窪地の土壤は、水（および堆積物）を斜面上部から受け、長期間、湿潤に留める傾向がある。ある土壤では下層に排水を妨げる層を持つことがあり、そのような場合も水停滞を助長して、有機物分解の減退が引き起こされる。通年の湛水土壤においては、植物の主な構成成分のひとつであるリグニンは殆ど分解しない。極端な湿潤あるいは沼沢条件の終局的結果、30%以上の有機物含量をもつ有機質土壤（泥炭または黒泥）が発達する。土壤が農業またはその他の利用のため人為的に排水されるところでは、土壤有機物は速やかに分解する。

肥料および農薬の使用

肥料または農薬の使用は当初は作物生育およびバイオマス生産を増進（特に減退した土壤では重要）する。しかし、ある種の肥料ことにN肥料および農薬は微生物活性を増進させて、有機物の分解を促進する。これらの化成品は微生物に易利用性のN成分を与える。このことは、土壤有機物のC:N比が高く、分解がN欠乏により遅延している土壤においては顕著な効果を表す。

土壤有機物を増加させる農法

慣行的作物生産の環境的および経済的影響に関する関心の増大は、代替系に関する興味を刺激した。そのような体系に関し中心となったのは、土壤生物学的過程を促して維持することと、化学肥料、農薬および機械的耕作の形態での化石燃料投入を最小にすることであった。土壤中の有機物の増加をめざす全ての活動は農業生態系での新しい平衡を創造する助けとなる（ボックス3）。

自然資源管理系が均衡を達成し持続的であるためには、急激な気候的な変動に耐え、社会的変化および経費の増減、土地への資本投入の可能性、労働力および知識の増加に応じて徐々に進歩しなければならない。適応的な農業体系は多様であり複雑であればある程、気候および市場の予測できない突飛な変動に直面しても安定的であり、持続的であろう。このようにして、一年生作物、木質永年性および非木質永年性

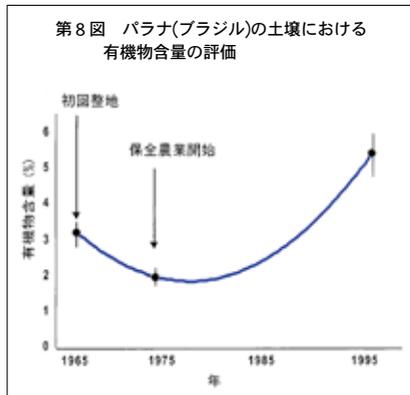
ボックス3 土壤の有機物含量を増加する方法

- ◀ コンポスト
- ◀ 被覆作物 / 緑肥作物
- ◀ 作物の輪作
- ◀ 永年生飼料作物
- ◀ 不または減耕起
- ◀ アグロフォレストリー

作物が様々な家畜あるいは樹木またはそれら両方と結合され、現在では農林田園系 (agrosilvipastoral systems) と一般に呼ばれるものになる。

異なった土壌および気候条件に対しては異なった問題解決法が要求される。しかし、農業は同じ原則に基づいている：すなわち活性の高い有機物を造り上げるためにバイオマス生産を増加することである。活性の高い有機物は、土壌構造と孔隙を造り、植物に栄養を用意し、また土壌の含水量を改善する有益な土壌生物に餌と棲家を供給する。

いくつかの例が土壌中の有機物レベルを回復することが可能であると示している (第8図)。被覆作物の使用や焼却禁止のような有機物集積および供給を促進する農法あるいは不ないし低耕起のような分解速度を減ずる農法は、土壌中の有機物含量の増加をもたらす (SampsonとSchles, 2000)。



Source: adapted from Derpsch, 1997.

バイオマス生産の増加

植物に対する水利用率 (water availability) の向上：集水 (water harvest) および灌漑

乾燥条件下にあつては、水は灌漑もしくは集水によって供給される。また水の有効性を増すことでバイオマス生産と土壌微生物活性を増し、有機物を供給する植物残渣と根を増加する。

集水という考えは、種々の表面流去水管理と利用方法の技術を含む。それには、(ある場合には上流捕捉域 (upstream capture area) 処理を通じて) 表面流去水の捕捉、作物生育と収量を増すために特定作物 (一年性または多年性) が利用できるよう特定領域に集めること、および補助的灌漑または生活、家畜用に集め貯溜することなどが含まれる。水収穫系デザインの目標は、表面流去水を生ずる面積と表面流去水が向けられる地域または貯溜構造の容量 (集められた水の容積) の最良比を求めることである。このようにして表面流去期間に作物栽培のために捕捉した水は、植物による次の利用のため土壌に直接か、あるいは小規模の農場貯水池または貯水槽に貯えられる



写真9 雨季に水を集めるため、窪みが掘り下げられている。

(写真9)。このようにすることで、土壌水分の有効性を増し、あるいは雨季内の乾燥期間に灌漑し、また乾季中へ作物生産を延長することによって、作物生産が安定化される。これらの表面流去水農法の体系および貯水池に関して考慮されなければならない幾つかの要点は：場所の選定、分水域の大きさと条件、降雨分布、表面流去水量、および水の必要量である。貯水池で最低1mの深さが維持できるところでは、魚を飼育して付加的な食料を供給することができる（FAO, 1984）。

多くの集水系が、何世紀にもわたって、殊に乾燥地では発達してきた。

作物生産のために表面流去水を集める原理は、多くの土地と水の保全技術に共通のものであり、個別の技術は表面流去および流入域の概念を、微小分水界レベルに適用したものである。例えばネガリムと呼ばれる台形または“眉形”の堤あるいは連結畦などにより水を集める技術である。（訳注 ネガリム (negarim)：イスラエル、インド他で果樹等の周辺に設けられる。）

鈎合いのとれた施肥

土壌中で養分供給が充分なとき、作物は良く生育し大量のバイオマスを生産できる。土壌中に養分が不足し、健康な作物（FAO, 2000）また充分なバイオマスを生産できない場合には肥料が必要である。サブサハラ アフリカ（SSA）の大部分の土壌ではリン酸（P）が欠乏している。リン酸（P）は植物生育に必要であるのみならず、N固定にも不可欠である。均衡を欠いた施肥は、たとえばNに偏った施肥をするとき、時には雑草との競合を激化し、病虫害および生産物の質の低下をひき起こしかねない。均衡を欠いた施肥は、いずれ不健康な植物を生む故、肥料は充分量を鈎り合った割合で施さねばならない。土壌の有機物含量が高いと、肥料利用効率は高い傾向がある。非常に痩せているか減耗した土壌では、作物は肥料施用を非効率的に利用する。土壌有機物レベルが回復すると、肥料は作物収量を高め、その結果として土壌へ還流する残渣量の増大をもたらす、土壌中の栄養の回転資本（revolving fund）の維持を助けることができる。

被覆作物

被覆作物（cover crop）の利用は、有機物レベル、従って土壌の質を改善するための最善の農法のひとつである。被覆作物の利点は以下の事項を含む：

- ◀被覆作物は土壌を固定し、雨滴の衝撃を減ずる。
- ◀被覆作物は植物物質を土壌に添加し有機物を補充する。
- ◀あるもの、例えばライムギ、は土壌中で余分な栄養素を結合し溶脱を防ぐ。
- ◀またあるもの、特にヘアリベッチのようなマメ科植物は、将来利用できるNを固定する。
- ◀殆どのものは、有益な昆虫およびその他の生物に棲家を提供する。

◀それらは土壤温度を緩和し、土壤生物を保護する。

一連の作物が植物被として利用できる。例えば、穀物、マメ科作物、および油脂作物などである。これらは全て土壤に大きな利益をもたらす可能性がある。しかし、それぞれの作物には特徴があり、特定の利点が多い作物もある。これは、輪作計画を立てるときに役立つ考えである。初年目には地表を高C:Nのため緩慢に分解する残渣を大量に残す被覆作物で始めることは重要である。イネ科作物および穀物は、土壤構造を速やかに改善する強い根系をもつので、この段階には最適である。

次の年には、土壤の健全性は改善し始めているので、マメ科作物を輪作に入れることができる。マメ科作物は土壤をNで富化し、その残渣は、低C:Nであるために、速やかに分解する。後に、系が安定してきたときには、経済的働きのある被覆作物、例えば、家畜飼料、を導入することが可能である。

被覆作物の選択には高レベルのリグニンおよびポリフェノールの存在がひとつの目安になる。これらの成分は、残渣に分解抵抗性を与え、長期間の土壤保護とより安定な腐植の生産をもたらす。

残渣成分の動態においてももうひとつの決定要因は、残渣の生化学的組成である。作物種、その化学的組成およびそれらを取り扱う時期と方法により、分解速度が異なる可能性がある（第9図）。

穀物種（カラスムギおよびコムギ）は、コモンベッチ（マメ科）よりも、分解に対し抵抗性を示す。後者はより低いC:N比とより低いリグニン含量をもつ故に速やかに分解を受ける。

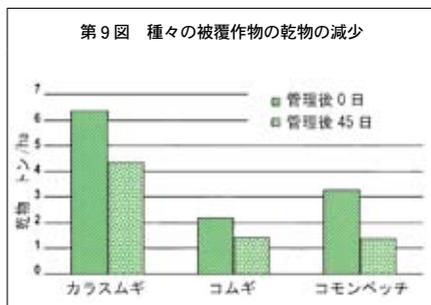
残渣が土壤表面に残される直播と被覆作物の使用のような農作業体系では多くのレベルの土壤動物相の発達と活性が刺激される。

緑肥（green manure）という術語はしばしば被覆作物として用いられる作物を示すために使われる。しかし、緑肥は特に輪作中に未分解物質を土壤中に取り込むために栽培されている作物を指す。この農法は特に有機物を増加させるために用いられているが、次の二つの理由で、特に暑い気候では、有機物の最も有効な使用方法ではない：

◀土壤の機械的攪乱はできるだけ避けるべきである。

◀バイオマスが土壤中に一気に取り込まれるとき、短期的に物質分解の微生物的活性の高まりが起こる。そのため、次の作物の幼植物により利用されない、従って系からの損失となる大量の栄養の集中的な放出をひき起こす。

一般的に、緑肥あるいは作物バイオマスの生産が大きいほど、糸状菌、微生物からミミズやシロアリに至るまで、土壤の微生物、中型動物および大型動物等の数は、大



Source: Ruedell, 1995

きくなる。土壤表面における残渣分解の動態は、中でも微生物や中型動物および大型動物の活動に依存している。大型動物は、主として、ミミズ、甲虫、シロアリ、アリ、ヤスデ、クモ、カタツムリ、およびナメクジから成る。これらの生物は残渣を土壤中に溶け込ませ、土壤構造、孔隙、水浸透、および穴の作成による養分の流れ、摂取および分泌などの改善を促進する。

土壤動物による土壤表面から深い層への被覆作物および雑草の自然な取り込みは緩慢な過程である。土壤微生物の活性は、大型動物が生物的攪乱活動によって微生物へ餌と空気を供給する故に、大型動物の活動により調節されている。このようにして、栄養素はゆっくりと放出され、長期間にわたって作物へ供給される。同時に、土壤は永い間残渣により覆われ、雨や太陽の衝撃から保護される。

作物立毛 (vegetative stand) の改良

ボックス4 植え穴

植え穴は、著しく脊白化した土地、とりわけ短期の自然生育による休閑（作物生産2-3年の後2-6年）のみでは土地の農業生産力の維持または回復を期待できない半乾燥気候の土地で、速やかな再生を成す(FAO,1994)。

脊薄化した土地の生産性の速やかな回復の例はサヘル地域で“Zai”と呼ばれる土着の方法である。(FAO,1994)。

乾季中に農民達は深さ15cm直径40cmの穴を80cm毎に掘り、土は投げ下ろす。乾燥した砂漠の風ハーマツタンがいろいろな有機物を掘ったあとの穴に吹き込む。有機物は速やかにシロアリにより消費されるが、シロアリは皮殻化した表面を突き抜けるトンネルを掘り、最初の雨を直接蒸発させることなく深くへしみ込ませる。雨季の始まる2週間前農民達は穴の底へ1-2掴みの乾燥糞を上げ、その上を土で被せて雨が有機物を流し去るのを防ぐ。

雨季の初めに穴の中にミレットを播種する。最初の雨が（脊薄化した土地の）表面皮殻上を洗い流すと、盆地はこの表面流水を捕捉する。（土地の窪みを深さ1mまで浸すのに十分である）。

播いた種子は発芽し、緩んだ表面皮殻を突き破り、根を深くの（シロアリによって再循環された）水と栄養の貯まりへと下ろしてゆく。

収穫期には、茎を高さ1mで刈りそのままに残して置くと風速を弱め、また風が霽す有機物を捕らえる。2年目には、農民は初めの穴と穴の間に新しい穴を掘って厩肥を施すか、また切り株を抜いて古い穴へ種を蒔く。

多くの所で、植物密度が低いことが作物収量を制限している。広い植物間隔はしばしば“土壤に力を戻す方法 (a way to return power to the soil)”として、あるいは“土壤に休息を与える方法 (to give the soil some rest)”として、採られてきた。しかし、実際にはそれは土壤脊薄化の指標である。植物の間隔は標準的基準が普及により推奨されていなければ、通常農民によって、土壤肥沃度、有効水または期待雨量に関連して、決定されている。これは、作物がしばしば乾燥および半乾燥地域の痩せた土壤において、全ての植物に十分な植物栄養と水の供給を保証する観点から、広く植えられることを意味している。

しかしながら、推奨された植物空間を維持することは、バイオマス生産と根張り密

度、従って土壤微生物の餌、湿度保持および棲家のための有機物を最適にするために重要である。一旦作物が定着すると、狭い作物畝間の日光は減少して、雑草の再生も抑制される。

植え穴 (planting pit) は、半乾燥気候下の著しく脊薄化した土地ではバイオマス生産と作物収量を増加するひとつの方法である。降雨は植物の近くに集められ、土壤生物と有機物集積も植え穴に集中する(ボックス4および写真10)。植え穴法はザンビアでは、肥料やトラクターサービスを受けられない小農に保全法として導入され成功を収めた。

アグロフォレストリー (agroforestry) および等高線栽培 (alley cropping)

アグロフォレストリーは、木質永年性植物 (樹木、灌木、ヤシ等) が農業体系と融



写真10

新たに植えられたアカシア苗の周りで半月状の穴が雨水を捉え貯えている。

ボックス5 世界のアグロフォレストリーの例

コスタリカではポロ (*Erythrina poeppigiana*) が遮光、土壌富化、生マルチおよび生垣のためコーヒー農園に広く栽植されている。

アジア諸国ではネムノキ (*Albizia spp*) が茶農園で用いられてきた。

インドネシアではギンネム (*Leucaena leucocephala*) が、浸食防止、土壌肥沃化および緑マルチのための丘陵地の等高線生垣として栽植されている。起伏地の約20,000haがこの体系に改変されたと推算されている。

西アフリカでおよぶルワンダでは多くの農民が自分の農地で農作物と一緒に樹木、灌木およびイネ科草木を植えている。

カリブ海諸国の多くのココナツ農園は一部をバナナと共に栽植し、あるいは放牧地として使っている。

ジャマイカの将農園のあるものはココナツ、バナナおよび柑橘を一緒に植えている。

(FAO, 1989)

合した土地利用体系にたいする集会的呼び名である (FAO, 1989)。

等高線栽培 (alley cropping) は、作物が栽植した木質灌木または樹木の列間に植えられるアグロフォレストリーである。

これらの樹木や灌木は栽培期には、緑肥とするためおよび作物の日陰を少なくするために、切り詰める (FAO, 1993)。

アグロフォレストリーは、食用作物、林業および放牧草種をさまざまなやり方で結合する (農林業、林間放牧、農林放牧および多目的森林生産) 広い範囲の系を含んでいる (ボックス5)。

アグロフォレストリーには二つの異なるアプローチがある。ひとつは森林農

園が確立するまで暫定的に土地を利用する手段として農業作物または放牧地を用いる方法である。もうひとつは作物生産と土地資源保護両方のために、作物または動物生産系の中に永年的に樹木と灌木を統合する方法である。このようにアグロフォレストリーには家庭菜園、移動耕作、および灌木休閑系などの様な多くの慣行的土地利用が含まれる (FAO, 1989)。

等高線栽培は改良灌木休閑系と考えられる。小樹木または灌木が作物栽培地に一列に、できれば等高線に沿って (作物の遮光を最小にできるところであれば東西方向の畝でも) 植えられる。畝間の空間が依存するのは: 傾斜; 土壌型と浸食され易さ; 雨量; 作物種; および土壌と作物の管理体系などである (FAO, 1995)。

永年性樹木および灌木は、有機物を系に添加するばかりでなく、根系によって深い土壌層から植物栄養素を再循環する。落葉落枝と剪定により、これらの栄養素は再び一年生作物によって利用される。恐らくこの生産系の中で永年性植物の最も重要な寄与は、年間を通じてその根が根分泌物と崩壊してゆく根細胞を供給し続け、それらが次に土壌微生物によってエネルギー源として用いられることであろう。土壌中の食物連鎖は、一年生作物が生育していない乾季の間も維持される。その結果土壌生物相は次の作期初めに作物に適切に栄養を供給することができる。

直播は、生垣を畑の周りあるいは中で列として確立するのに最も容易かつ安上りな方法である。しかし発芽した実生はさらに世話をしやらないと雑草との競合に打撃つことができないことがある。従って、苗床で幼植物の生長を始めて後移植することがいくつかの種では必要である。ある種では挿し木で定着できる。うまく定着できると、植物は干天続きにも家畜の齧りにも良く耐えることができる。生垣を巧く定着させるのに欠かせない条件は選んだ植物が最初の作物収穫時に雑草を圧倒するだけ充分に高くなることである。

作付け期間には樹木による作物の遮光を避けるため生垣を刈り込むことが必要となる (写真11)。刈り込みの時期および頻度は用いた樹種と季節による。一般則として、

生垣が低く作物は高いと、刈り込み頻度を少くすることが求められる。

Leucaena leucocephala や *Gliricidia Sepium* のように生育が速い樹種では作付け期間中に6週毎に刈り込む必要があるかも知れない。それらにはよく約50cmの高さにまで刈り込まれる。過度に頻繁に刈り込むと胴枯れをひきおこすことがある。樹木と木質灌木を作付け体系に組み入れることは、クエズングアル (Quezungual) 法を採用したホンジュ



写真11

樹木による遮光によりトウモロコシの生育は準最適であるアグロフォレストリーの区画。

ボックス6 農民のクエズングアル法の受け止め方：利益と不利益

地方農民によるとクエズングアル法は多くの利益をもたらす。

- ・ 土壌水分保持が良くなり、乾季中途での2 - 4週間の小旱期にも（また1997年のエルニーニョの乾燥期間）作物を良く生長させる。
- ・ 樹木および灌木からの薪炭や果樹の生産。
- ・ 農業生産が慣行的管理区よりも高い。
- ・ クエズングアル区は焼畑系よりも長期間耕作出来る。
- ・ 7年後木材を伐り建築に用いたまたは売ることが出来る。
- ・ 樹木や灌木の刈り込みで採れるマルチが驟雨の衝撃から土壌表面を保護し、土壌浸食を減らす（1998年のハリケーン“ミッチ”の際でもほとんど侵食はなかった）。
- ・ クエズングアルを立ち上げ維持する労力は少しですみ。
- ・ 土壌がより肥沃になり肥料の効果が高くなる。
- ・ 土壌が柔らかくなるので土壌の易耕性が良くなり、播種の際の労力が少なくてすむ。
- ・ この区で働くとき、クエズングアル法は日陰を提供してくれる。
- ・ 収穫したマメやトウモロコシのような収穫物を樹の幹にかけて乾かすことができる。
- ・ トウモロコシやソルガムを収穫した後、残りを牛が餌に出来る。
- ・ マルチ被覆がマメ科作物の罹病を減らす。
- ・ 区内に樹木や灌木があると鳥や蝶のような動物や昆虫がやってくる。

農民が挙げた不利益

- ・ 初年目には生産は、慣行法による穀物生産と比べ同程度ないしやや低くなった。
- ・ 実行し始めてから初めの数年はマメ作物のナメクジ害が多かった。
- ・ 土壌被覆が多すぎると種子の発芽を妨げることがある。
- ・ クエズングアル法では、日陰になりがちな雨季には病気罹患立を高めることがある。

(FAO, 2001)



写真12

クエズングアル、アグロフォレストリー、の例

ラスの農民が述べているように、付加的な用途と多くの利益がある（写真12およびボックス6）。しかしながら、短期借地（short-term land tenure）の農民はそれらの利益に興味を持たないかもしれない。さらに、樹木プランテーションは土地借地権の状態に時々影響を及ぼす；従って小作人は農業用地に樹木を植えることを許されない場合がある。またアグロフォレストリーは機械化を阻害することがあり、殊に生垣の刈り込みに労力投入を増やすことが

必要になることがある。

生垣樹種はアグロフォレストリー法に固有の複雑な諸関係（光、水および栄養に対する競合、アレロパシー（allelopathy, 他感作用）、病虫害の発生等）がある故に作物栽培に不利な影響を避けるよう注意深く選定しなくてはならない。多くの農民が生垣を有益ではないと考えている。殊にその積極的な効果が確かでないか目に見えない処

では、その可能性がある。家畜が自由に放牧を許されている場合には、幼木保護に特別の手段を採らないと、生垣の確立は困難なことがある。囲い込みあるいは放牧動物の制限は地方共同体の集団的努力と合意が必要かもしれない。

余分な労力が必要なこと、作付面積が減少することおよび機械化が困難なことにより、生垣種が果実、薪炭木あるいは建設用杭/木材目的のような(栄養再循環および侵食防止効果のほかに)直接的利益を伴わないと、等高線栽培が不経済になる可能性もある。

森林再生 (reforestation) および植林 (afforestation)

植林 (afforestation) は最近樹木が生育していない土地に森林を育成することを意味する。それは二つの基本的な土壌および水保全目的に役立つ：すなわち侵食し易い地域の保護および荒地の植生再生 (afforestation) と回復である (写真13)。植林は特に脆弱で急峻な山岳地帯に保護被を設ける為に用いられる。植林は木材資源を補充し薪炭木と飼料を供給するのを助ける (FAO, 1979)。



写真13
ニジェールにおける“バッドランド”の植林

森林被覆を良い管理の下で回復することは有機物生産を増進する効果的な手段である。しかし、土地はそれぞれ適当な森林型を支持する固有の生産容量を持っており、それらは気候、土壌、傾斜および森林の特定の目的 (木材生産、家畜放牧等) により異なっている。従って、樹種の選定と適した場所の選定は植林を成功させる上で特に重要である。

必要とされる種および出自 (provenances, 適応品種) の良質の種子を充分量入手できることがどの植林努力にも必要条件となる。しかしながら、そのような種子の適当で信頼の置ける入手先を見つけることは、しばしば困難である。

多くの種では満足できる発芽と均一な立毛を達成するために、種子および実生の特別な前処理が要求される。そのような前処理には、種子を種々の期間水に浸すこと、浸潤と乾燥を繰り返すこと、水浸透ができるように種子被を除去あるいは傷つけること、種子を熱水に入れること、時には短時間煮沸することさえ含まれる。ある樹木の実生は、菌根菌または根粒菌が得られた土壌に植える時に、菌根菌処理が必要である (例、セネガルの砂質土壌における *Casuarina* 種)。その目的は植物の発芽数を確実に多くし、播種後の発芽を速やか且つ均一にすることである (FAO, 1974)。

植林は直播または苗床から幼植物を移植することで行える。直播の利点は経費低減

である。しかし、この方法は通常著しく信頼性が低く、以下の様な場合にのみ妥当性がある：

- ◀種子が充分あり且つ安価であること；
- ◀圃場条件で充分な発芽が信頼できること；
- ◀実生が速やかに深い直根を伸ばし発芽後の時期に不利な気候条件に耐えられること。
- ◀生育速度が充分速く長期の世話や除草の必要がないこと。

自然植生の再生

自然草地および森林地域の再生はバイオマス生産を増加し植物種の多様性を改善し、土壌生物相およびその他の関連する有益な生物を一層多様にする。土地があまり生産的ではない処では自然の再生がより信頼できる可能性がある。ある場合には、一定地域の自然の再生はその区域に雑草をはびこらせることになるかもしれない。自然植生の再生が以下の様な複合的な目的に優利であることが次第に認められるようになって来た、例えば、薪炭木、繊維、生物制御（例、インドセンダンボク）および薬用種、また土壌肥沃度回復（*Acacia albida*その他のマメ科種）、いろいろな有益種（受粉者および天敵）および野生動物などを含む多様な目的の場合である。

土壌有機物供給の増加

火災からの保護

火災は有機物再循環に顕著に影響する。火は樹幹および大枝を除き殆ど全ての地表にある有機物を破壊する。更に、表土は殺菌され、有機物部分を失い、土壌微小動物相および大動物相の数は減少し、それらの数を急速に回復するのに必要な易用性有機物が失われる。しかしながら、この方法は、家畜のため放牧地の再生を促し（残留するPを利用）、病虫害を制御するためあるいは食用の小動物を捕獲するためなどに、広く用いられている。

特殊で難しい事例として、サトウキビを収穫前に焼く作業がある。それは技術的側面（CO₂および温室効果ガス放出、収穫の機械化、砂糖含量など）と社会的側面（手刈り、貧しい/土地無し労働者のための生存手段の元）の二側面をもつ。その損害は、植生型、気候条件および頻度の関数である火入れ強度に依存する。火入れ（法）と有害な影響を最小化するための方法の損益がその地方の人々と共に決められる必要がある。

作物残渣の管理

作物残渣が良く管理されている体系では、人々は：

- ◀ 土壌有機物を増し、播種床の質を改良し、土壌の透水性と保水力を増し、pHを緩衝し、栄養素の有効性を促すことができる。
- ◀ 土壌中にCを取込む（貯蔵）ことができる。
- ◀ 土壌微生物活性および植物吸収のため栄養素を供給できる。
- ◀ 土壌表面で降雨を捕らえ、浸透と土壌水分含量を増大させる。
- ◀ 侵食から土壌を保護する覆いを提供できる。
- ◀ 土壌表面からの蒸発散や乾燥を減少させる。

次期作の性質によって、残渣を均等に散布するか、あるいは、例えば這い上がり被覆植物（例、ムクナ）がトウモロコシの茎を柵として使うように残すようそのままに残して置くか決定する。

残渣の均等な散布は：(i)播種期に均等な温度と湿度条件を与え；(ii)均質な播種、発芽および発生を促し、(iii)病虫害の発生を最小化し、(iv)多感作用により雑草の発生を減らす。



写真14 ナイフローラーを用いた作物残渣管理

作物残渣を管理する最適の方法は作物残渣利用の目的と、農民のもつ経験と道具に依存する。その目的ができるだけ長期間土壌にマルチを維持することである場合には、バイオマス管理はナイフローラー、鎖またはそり（スレッジ）を使い、残渣を碎き込むが殺さない方法が最良の方法である（写真14）。分解過程を直ぐに始めて養分を速やかに放出させる必要がある場合には、残渣の粉碎しあるいは

刈取後、残渣のC:N比が高いので、若干N肥料を施用する。その時、硝酸の発生を避けるため尿素は表面に散布せず、できれば注入することが望ましい。

飼料作物の収穫によらぬ放牧による利用

多くの場合、飼料、屋根葺き、職人の手芸用等としての利用のため作物残渣に対する競合がある。残渣が動物餌に使われる处では、動物は残渣を直接食べるかまたは小屋か囲い飼いをされる。

残渣の圃場からの持ち出しは、動物厩肥が圃場に還元されない場合には、有機物の著しい損失になる。放牧を制御することで、動物排泄物は圃場に労力を多く投入することなく還元することができる。

エルサルバドル、グアイマングの経験は、作物残渣の配分に競合を生ずることなく、作物と家畜要因を巧く統合できることを示した（ViciraとVan Wambeke, 2002）。高い茎/穀粒比をもつソルガム地方品種（HYVの代りに）が主たる理由で（Choto,

SainとMontenegro, 1995)、この系で生産される残渣量は土壤被覆と家畜用餌の両方に充分役立ったのである(ChotoとSain, 1993)。農民達は残渣を土壤被覆として尊重しているので、放牧権、家畜数および放牧期間を取引する餌市場が発達した。

タンザニア連合共和国の北部地帯では、農民達は労働集約的ではあるが、残渣を放牧に使うか土壤被覆に使うかの間に妥協を見出した。彼等は作物残渣を味の良い部分とそうでない部分に分け、味の良くない部分は土壤被覆に用い土壤生物の餌にさせ、一方味の良い部分を家屋敷近くに飼っている牛と山羊に給餌している(写真15)。

総合的病虫害防除 (integrated pest management)

均衡の取れた施肥と相俟って、適当な病虫害管理は健康な作物を育てる。健全な作物は土壤中で有機物生産に必要で最適なバイオマスを生産する。多様な作物栽培および複合的作物一家畜体系は種間相互作用によって生物的病虫害制御を強める。総合的生産と病虫害管理を通じて農民は作物に対する健全な環境を維持することを学ぶ。彼等は害虫と天敵(有益な捕食者)の比率と



写真15 家畜に給餌する農民。

損害事例を観察する為に定期的に作物を点検し、それに基づいて自然処理(インドセンダンやタバコのような地方の産物を用いる)か化学処理をするかについて決定を下し必要な処理をすることを学ぶ。

家畜厩肥 (animal manure) あるいはその他の炭素に富む廃棄物の施用

家畜厩肥、スラリーまたはカスカラ (cascara, coffee-berry 訳注: クロウメドキ属) パルプのような炭素に富む廃棄物などの施用でも土壤の有機物含量が改善される。ある場合には、圃場に施用する前に分解期間を設けるほうが良いことがある。どの炭素に富む廃棄物の添加でも、微生物が生育および増殖にCとNの両方を必要とするため、土壤中では一時的に有効窒素が不活性化される。動物厩肥は通常Nに富むためN不活性化は最小限に止る。藁が厩肥の一部になっている時には分解期間を置くことで圃場におけるN不活性化が回避される。

コンポスト

コンポスト化は農業生産を増大するために有機物を循環させる技術のひとつである。生物学的および化学的諸過程が分解速度を加速し、有機物をより安定で土壤施用に適した腐植に変える。コンポスト化はコンポスト堆またはコンポスト穴の制御された条件下で進行する (Müller-Sämann, 1986)。

コンポスト堆は最低1 m²が必要でありコンポストに水かけをすることのできる環境が適している。コンポスト穴（写真16）は70cmより浅く、コンポストの通気を良くするため底に粗い材質のものを敷きつめる。コンポスト穴法は乾いた環境で特に適している（Müller-Sämman, 1986）。乾コンポスト化はコンポストを土壌で覆い嫌気的な条件を創ることで行う。しかしながら、これはより普通の好気的な過程よりも緩慢に進行する。コンポスト堆のC:N比は微生物的過程を最適化するために重要である。その目的のため、軟らかい緑色の材料と褐色で粗な素材の組合せが用いられる。灰やリン鉱石がコンポスト化過程を促進するためにしばしば使用される。



写真16

魚の廃棄片と集落廃棄物からコンポストをつくる。コンポストプラントは若者の共同により運営される。

コンポストはある作物輪作体系およびアグロフォレストリー系を補うことができる。それは栽植穴や苗床に効果的に用いられる。コンポストの組成は土壌有機物に非常に良く似ており、土壌中で緩やかに分解し土壌の物理的条件を改良するのに適している（これに対し厩肥および汚泥はかなり速やかに分解し、植物生育に対し栄養素を集中的に放出する）。多くの場合添加される有機物は土壌の無機質部分に比べて少ないので、この方法によって痩せた土壌を若返らせるには相当の時間が掛かる。

コンポスト化の成否は有機物、水、厩肥および“安価な”労働力が充分利用できるか否かに掛かっている。これらの投入が保証される処であれば、コンポスト化は持続的かつ生産的な農業の重要な方法となり得る。それは土壌肥沃度、物理的、化学的および生物学的な土壌諸性質の改良をもたらす。良くできたコンポストは植物に必要とされる全ての養分を含んでいる。それは土壌肥沃度の維持改良のためにも、また脊薄化した土壌を回復させるためにも使われる。しかし、コンポスト生産には材料の供給が不十分なことがあり、あるいは適当なコンポスト生産および施用に高価な労働投入を必要とすることがある。それらの理由でコンポストの施用は、一定の作物、限定された地域、例えば家庭菜園の野菜生産など、に限定されることがある。

マルチ（mulch）あるいは永年的な土壌被覆（permanent soil cover）

土壌条件を改良するひとつの方法は、目的とする領域をマルチ（被覆）することである。マルチは雨滴の衝撃および侵食から保護する為土壌表面に置かれる材料である（FAO, 1995）。作物残渣マルチは藁、トウモロコシ茎、ヤシ葉、や土壌表面の切り株のような植物質残渣による保護覆いを維持する方法である（写真17）。この方法は侵食リスクが甚大であるが十分な植被が速やかに確立できない処で特に有益である

(FAO, 1993)。

マルチは有機物を土壌に加え、雑草の生育を抑え、地面がマルチで覆われている間は侵食を事実上除去できる。

二種類のマルチ法がある：

◀その場のマルチ法 (*in situ* mulching system)

—植物が地面に倒れた位置で残渣が残る (写真17)。

◀刈取り運搬マルチ法 (cut-and-carry mulching system) —植物残渣を他所から運搬してマルチとして用いる (写真18)。

作物残渣マルチ法は作物生産に多くの利益をもたらす。しかし、それは現存の栽培法に変化を要求することがある。例えば、農民達は慣行的に作物残渣を土に返す代りに燃している場合がある。その場マルチ法は適当な栽培体系と輪作体系に依存しており、それらはその農法に統合されなければならない。刈取り運搬法ではより多くの労働を要することが主たる制約である。マルチ法は低集約的農業体系へよりも家庭菜園あるいは高価な園芸作物に適しているかもしれない。

マルチは土壌の生命に影響する。HollandとColeman (1987) は土壌表面へ落葉落枝を置くと(鋤込みとは反対に)細菌に対する糸状菌の比率を上げることがを示し、その理由として糸状菌が細菌よりも高い炭素同化効率を持つためであると述べている。さらにマルチは材料を土壌表層に引き込む大動物相の攪乱混合効果を助長する。

分解速度の減速

低または不耕起 (reduced or zero tillage)

繰返しの耕起は土壌構造およびその水分保持能力を破壊し、土壌有機物量を減少させ、団粒を壊し、ミミズの様な養分循環と土壌構造に寄与する土壌動物相の数を減少させる。

機械的土壌攪乱の回避は、前作の収穫後、機械的播き床準備や土壌攪乱なしで作物を生育させることで達成される。不耕起という術語はこの行為に対して用いられ、無耕農法、不耕起、直ドリルまたは直播などと同義である。



写真17
クロカラスムギのマルチによるトウモロコシの直播栽培、ブラジル、サンタカタリナ州。



写真18
レタス畑で働く農民

ボックス7 北タイ高地におけるマルチ法

何故、ある作物はマルチを受け入れ、他は受け入れないのであるうか？

マルチ法はその栽培作物にある特別な利益をもたらす。

マルチ法は特殊な理由があっているいろいろな換金作物に行われている。タマネギとニンニクでは主として雑草抑制のためにマルチされる（初期の手作業では作物を傷めることなく行うことが困難である）。これらの作物は普通乾季に灌漑をして育てられるので、マルチは土壤を湿潤冷涼に保つために重要である。マルチはまた花卉とイチゴに、主として傷つき易く高価な生産物が傷まぬよう保護するために用いられる。

マルチは労力を軽減する。マルチはしばしばトウモロコシ畑で作物が確立する前および後に見られる。トウモロコシは雑草に負けない。

従って農民のある者は除草剤で防除した雑草のマルチの中に不耕起でトウモロコシを栽植する—これは耕起法よりも労力を必要としない。

トウモロコシは大間隔で栽植されるので、一般に軽い除草で済む。除草はしばしば刈り払いにより行われ、雑草残渣は地上に放置される。



写真 19

北タイ高地におけるマルチ法

(Source: Van Keer et al., 1996)

慣行の耕起と比べ、低または不耕起は土壤有機物に関して二つの利点をもつ。慣行の耕作は土壤の通気によって従属栄養的微生物活性を刺激し、無機化速度の加速をもたらす。土壤構造の破壊により、新鮮残渣の消化で“腐植”生産に大いに貢献しているミミズのような土壤動物の上下運動を減少させる。低または不耕起は、孔隙ガスの CO_2/O_2 比を高め、“腐植化促進生物群”の活動を促すことにより、従属栄養的微生物活性を制御する (Pieriら、2002)。

耕起は最も普遍的な雑草制御の方法になっている。しかし、雑草制御の目的にはマルチが環境的に健全な行為である。耕起から来る柔軟にみえる土壤は構造が減少している；見掛けは当てにならない。その後の交通や大雨はこの柔らかくなった土を直ぐに堅め、柔軟な土壤をつくった高価な耕運を無にするばかりでなく、終には水の浸透、種子発芽、および根の発達に対して劣った環境を残す。この土壤を再び柔らかにするため更に耕起を反復することが要求される；更に出費をして同じ結果—引き続き孔隙の再充填と減退した土壤構造を残す。これが慣行的農業の典型的な“下降螺旋”である。その上に土壤が過湿あるいは過乾の時の耕運は土壤を堅密化や粉碎へ導く；しかも農民は最適条件を待つという選択肢は持たない。

深刻で加速する土壤侵食と播種準備にかかる労力とエネルギー経費の高騰によって、温帯および熱帯気候下の栽培では不耕起が広く採用されるようになった。不耕起法では、作物は前作の収穫後、攪乱せずに残された土地に播種される。作物残渣マルチは地に維持固定される。雑草制御は機械的刈り払いか被覆作物によって行われる

(FAO, 1993)。接触除草剤も場合により用いられる。

低耕起または不耕起法においては、土壤動物相は徐々に生攪乱活動 (bioturbating activity) を再開する。それにより土壤は柔軟になり土壤成分が混合される (生耕運 (biotillage) と呼ばれる)。土壤有機物増加および穿孔の利益は、高価で時間がかかり劣化の危険を伴う耕起なしで安定で孔隙に富む土壤構造を創造することである。

不耕起法では、土壤動物相の働きによって被覆作物と雑草残渣が次第に土壤表面から土壤中へと取込まれる。微生物の活性は、穿孔により餌と空気を供給する大型動物によっても支配されている。このようにして、栄養はゆっくりと放出され、次の作物に供給される。

研究者たちは作物輪作と不耕起法と根粒菌 (*Bradyrhizobia*) の数、根粒着生そしてN固定および収量との関連を報告している (VossとSidirias, 1985, Hungariaら、1997、Ferreiraら、2000)。

第10図は、慣行耕起に比べ不耕起法は根粒菌数を200~300%増加したことを示している。輪作中にダイズがあるとダイズが含まれない栽培体系に比べて根粒菌数が5ないし10倍に増加している。

厳密にいうと不耕起という言葉は土壤攪乱を含まない方法すべてを指すが、その様な条件を完全に達成するのは困難である。種子を散布するのは不耕起を適用するひとつの方法である (写真20)。種子を前作残渣の上に広く散布し、残渣を振って種子が土壤表面に落ちるのを確実にする方法がある。

直播ドリル法 (direct drilling) では、トウモロコシ、ソルガム、ダイズおよびオオムギなどの種子を前作残渣に切込まれた浅い溝に直播する (写真21)。雑草は、その植物の茎を機械で叩き倒すか、あるいは除草剤で化学的に制御する。

作物残渣を焼却する慣行的方法は不耕起法の導入を妨げるかもしれない。多くの状況下で、

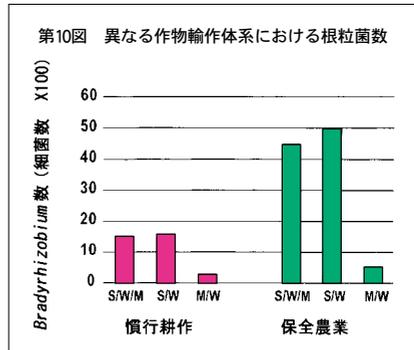


写真20
“フリホルタパド” (Frijol tapado) すなわちトウモロコシ残渣上へのマメ散布; ラテンアメリカで普通の方法。

作物残渣を地表に残すかあるいは餌が欠乏する乾季に家畜の餌にするかの選択の間で競合が起こる。

機械的土壌攪乱 (mechanical soil disturbance) は車輪の衝撃による土壌の緊密化をひき起こす。このことは、プランテーション (サトウキビ) や二年生作物 (ワタ) のような大規模機械化農業に於いて殊に重要である。不耕起農法においては、圃場におけるタイヤ/車輪の不規則走行および動物の蹄による緊密化の可能性の両方共を考慮に入れる必要がある。Pietola, HornとYli-Halla (2003) は土壌構造に対する家畜の踏みつけの破壊的効果について報告している。

Proffitt, BendottiとMcGarry (1995) はヒツジによる踏みつけの結果土壌表面の土壌孔隙が殆ど全て失われたことを示した。牽引動物はトラクターより土地劣化をひき起こすことが少ないと信じられている。

しかし、マラウィ (Douglasら, 1999) およびバングラデシュ (Brammer, 2000) において小農経営農場における土壌緊密化の報告がある。牽引動物の蹄および一定深度で繰返し使われる鋤や鍬の剪断は、顕著な緊密層を形成することがある。湿潤な土壌条件では緊密化のリスクは最大なので不耕起圃場から放牧動物は遠ざけるべきである。

車輪を備えたすべての機械類が圃場内で永久的かつ一定の跡に従って走行するよう規制しているところでは、土壌の緊密化が特定の領域だけに限定されている (写真22)。その代替としては緊密化の可能性を低下させるため、沈下抵抗性タイヤ (low ground-pressure tyres 低接地圧タイヤ) を全ての大型トラクター、ハーベスター、圃場内穀粒貯蔵器、等に装着すべきである。

最近の研究は車輪による緊密化がミミズの発生および生存に対して甚大な影響を及ぼしていることを示

している (Pangnakornら, 2003)。それによるとミミズの発生率は車輪走行下よりも走行規制下の方が大であった。第11図はミミズ数に対する車輪走行と耕耘作

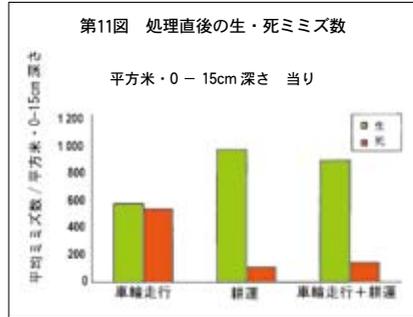


写真21
コムギ残渣中に直播ドリルしたトウモロコシの実生。



写真22
オーストラリアにおける農場入り口の標識。この農民は、無耕起と走行規制の実行性のある組み合わせを創りあげ、土壌中の良好な水分保持容量、よい有機物状況、保証された収穫、期待しうる報いのある農法体系などの結果を得ている。

業直後の影響を表している。走行がミミズの生存に最も有害な影響を持っていること、および走行直後に耕耘をした場合には生存率ははるかに高まることを表している。これは圃場において直ぐに救い出されるなら、最初の緊密化から生き永らえることができる事を示唆している。そうでないとミミズは動けなくなり、空気と栄養を摂ることができなくなるのであろう。



Source: Pangnakorn et al., 2003.

第5章 旱魃抵抗性土壌（drought-resistant soil）の創出

土壌有機物が土壌の諸性質に及ぼす影響

土壌有機物は土壌の化学的および物理的性質の両方に影響を及ぼし、土壌の全体的な健全性を左右する。土壌有機物により影響を受ける諸性質には次のような項目が含まれる：土壌構造；容水量；土壌生物の多様性と活性、いずれも作物生産に有益にも有害にもなり得る；栄養素の有効性。それはまた化学的改良、肥料、殺虫剤および除草剤等の効果にも影響する。この章は土壌水分と水質に関連した性質に焦点を合わせる。第6章は持続的食料生産に関連した性質に重点を置く。

雨水の非効率的利用

乾燥地域は降雨が不規則か不十分というばかりではなく、雨量の40%にも上るかなりの割合が表面流去水として失われるため、作物収量は低い。降雨利用率が低いのは自然現象（起伏、斜面、降雨強度）の結果でもあるが、また不適當な土地利用法（例、作物残渣の焼却、過剰耕作、生垣除去等）の結果でもある。それらが有機物レベルを下げ、土壌構造を破壊し、有益な土壌動物を除去し、水浸透を不利にしたためである。しかしながら、ある農民にとって表面流去水（run-off）として“失われた”水は、下流の水使用者にとっては、地下水と河川を再充填するのに用いられたのであるから、失われてはいない。

降雨が土壌表面に達するところでは、一部は土壌にしみこんで土壌水を充たし、あるいは流れて地下水を再充填する。他の一部は地上流として流れ、残りは保護されていない土壌表面と植物葉から直接蒸発して大気中に戻ってゆく。

上述の諸過程は同時に起るのではなく、幾つかの過程は降雨の間に直ちに起り（表面流去 run-off）、他の事象は連続して起る（蒸発および発散 evaporation and transpiration）。

旱魃の影響を最小にするには、土壌が降って来る雨を捕らえ、その水をできるだけ沢山植物が利用できるように貯え、植物根が土壌へ貫入し増殖できるようにする必要がある。これらの条件のうち一つかそれ以上の制約が土壌水分を有効に利用する上で主要な制限要因となっている。

土壌が水を保持あるいは放出する容量は、土壌の粒径組成（soil texture）、土壌深度、土壌構成（soil architecture、孔隙を含む物理的構造）、土壌有機物含量および生物学的活性に依存している。適当な土壌管理によってこの容量は改善できる。

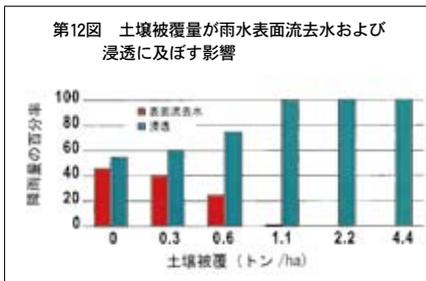
土壌水分含量を増す方法は三つのグループに分けられる；(i)水浸透を増大する方法；(ii)土壌蒸発を管理する方法；(iii)土壌水分貯蔵容量を増大する方法。これらの方法は全て土壌有機物に関連している。

旱魃抵抗性土壌 (drought-resistant soil) を創出するためには、土壌水分に影響する主要な要因を理解する必要がある。

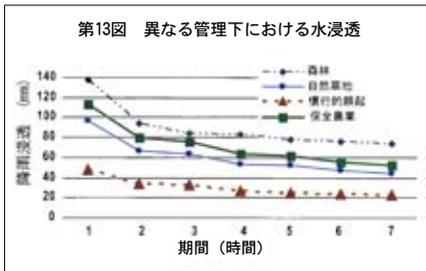
土壌水分の増加

有機物は土壌の物理的条件に幾つかの筋道で影響を及ぼしている。植物残渣は土壌表面を蔽って土壌を雨滴の衝撃による密封 (sealing) や皮殻形成 (crusting) から保護すると同時に雨水の浸透を増し表面流去水を減じる。表面浸透 (surface infiltration) は団粒化、安定性、孔隙連続性 (pore continuity) とその安定性、亀裂の存在、および土壌表面条件等を含む多数の要因に依存している。

有機物の増加は (土壌動物相の活性の増加を経て) 土壌孔隙に間接的に寄与している。



Source: Ruedell, 1994.



Source: Machado, 1976.

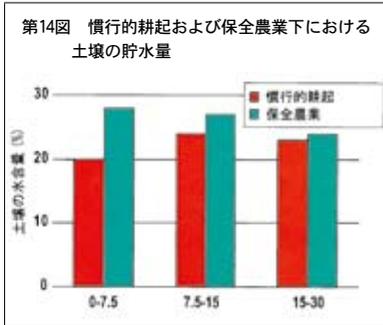
新鮮な有機物はミミズのような大動物相の活動を刺激する。ミミズは体から粘着性のある分泌物で裏打ちした穴を開け、断続的に糞物質で充たす。

土壌中に浸透する雨水の割合は与えられた土壌被覆の量に依る (第12図)。この図は裸地 (被覆0t/ha) では、表面流去水および侵食はマルチを施した場合よりも大きいことを示している。土壌表面に残された作物残渣は土壌団粒化と孔隙を改善し、大孔隙数を増して浸透速度の加速へ導く。

有機物レベルの増加量とそれに関連した土壌動物相は孔隙量を増し、直接的な結果として水浸透をより速やかにし土壌中の貯水量の増加をひき起こす (Roth, 1985)。孔隙改善はミミズや他の大生物の生擾乱 (bioturbating) 活動および崩壊した植物根の跡に土壌中に残された回路がもたらしたものである。

ブラジル南部のある地点で、雨水浸透は慣行耕起下の20mm/hから不耕起下の45mm/hに増加した (Calegari, DaroltとFerro, 1998)。有機物状況が改善すると長期に亘ってよい土壌構造と大孔隙の形成が促され、水は森林土壌と同様容易に浸透する (第13図)。

高い有機物含量に基づく水浸透増加の結果、土壌中の貯水量が増える (第14図)。有機物が土壌団粒および孔隙の安定性に寄与するのは、細菌の廃棄生産物、有機膠化体 (gels)、糸状菌菌糸あるいは虫分泌物、糞の様な有機物の接着性 (bonding or



Source: Gassen and Gassen, 1996.

させると報告している。

これらの化合物はさらに分解しつつ、時が経つ中に系から失われ、土壌団粒の安定性も減少してゆく。フレミンジア (*Flemingia macrophylla*、エノキマメ属、熱帯飼料作物) 残渣からの土壌結合性物質 (soil binding compounds) の緩慢な放出は土壌団粒のゆっくりとしてはいるがより持続的な安定性増加をもたらす。このことは土壌結合化合物の継続的な放出が土壌団粒の安定性の連続的な増加が起こる為には必要であることを示している。

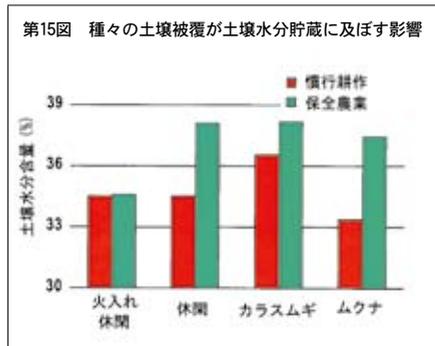
ElliotとLynch (1984) は、土壌団粒は、残渣が低N含量である状況のもとで、主として多糖類生産によって増加することを示した。土壌炭素含量と団粒径の間には強い相関がある。土壌炭素含量が増加すると2 mm以上の団粒が134%増し、0.25mm以下の団粒が38%減少した (Castro Filho, MuzilliとPodanoschi, 1998)。土壌Cの活性のある画分 (Whitbread, LefroyとBlair, 1998) は団粒崩壊を制御する主要な要因である (Bell, 1999)。

更に放線菌や糸状菌の菌糸は長生せず年々新しいものと置換わるが土壌粒子を連結するのに重要な役割を担っている (Castro Filho, MuzilliとPodanoschi, 1998)。GuptaとGermida (1988) は6年間の連続耕作後に糸状菌の減少と土壌の大団粒の減少が強く相関していることを示した。

土壌内貯留 (in-soil storage) 水は整地の形のみならず被覆の形、土壌上の前植生に依存している。第15図は植生の火入れが土壌中に貯留される水量に影響する状況を示している。

adhesion properties) による。その上、無機土壌物質とよく混合した有機物は含水量の増加に顕著に影響する。特に有機物含量が高い表土においてはより多くの水が貯えられる。

作物残渣の質、とりわけ化学的組成は土壌構造および団粒化に対する影響を決定する。Blairら (2003) はウマゴヤシ種 (*Medicago truncatua*) およびイネ (*Oryza sativa*) 藁残渣は、分解が早く、多くの土壌結合成分を放出することにより団粒安定性を速かに増加



Source: Siqueira et al., 1993.

休閑植生を土壤表面の覆いとして保全し、蒸散を減ずると、土壤中の水は4%以上増加した。これは大凡降雨増加分8mmに相当する。この余分な水量は一時的な乾燥期間に萎凋と生存の差となりうるものである。

1999年にグアテマラ、ホンジュラスおよびニカラグアで農一生態系の弾力性(resilience)を評価するために行われた研究では、生態的に健全な方法の下では土壤中に貯えられる水が3~15%多いことが示された(第4表)。

第4表 湿状態が始まる土壤深度と貯蔵水分量差

国	農業一生態学的に健全な方法 cm	慣行法 cm	差 (%)
ホンジュラス	9.98	10.28	2.9
グアテマラ	2.44	2.99	15.0
ニカラグア	15.81	17.80	11.2

Source: World Neighbors, 2000.

Unger (1978) は、コムギ残渣レベルが高いときには休閑期間の降雨の貯留量を増し、その結果ソルガムの穀粒収量が増加することを示した。8-12t/haの高残渣レベルのときには植栽時の貯留土壤水分量が80-90mm多く、ソルガムの穀粒収量が残渣無施用時に比して約2.0t/ha多かったのである。

土壤への有機物添加は通常土壤の容水量を増大する。これは有機物添加が、土壤粒子と一緒に“接着”するかあるいは有機物が土壤生物に好都合な生活環境を提供することによって、土壤中の微および大孔隙数を増すためである。あるタイプの土壤有機物は水中で自重の20倍まで持ち上げることができる(Reicosky, 2005)。

Hudson (1994) は土壤有機物が1パーセント増す毎に土壤中の有効容水量が3.7パーセント増加することを示した。土壤水は土壤中における粘着力(adhesive)および凝集力(cohesive)によって保たれ、孔隙空間が増加すると土壤の容水量の増加がもたらされる(第5表)。

第5表 土壤被覆による灌漑水経済、ブラジル セラード

土壤被覆 (%)	水要求量 (m ³ /ha)	水要求量の減少 (%)	季節内灌漑回数 (回)	灌漑間日数 (回)
0	2 660	0	14	6
50	2 470	7	13	6
75	2 090	21	11	8
100	1 900	29	10	9

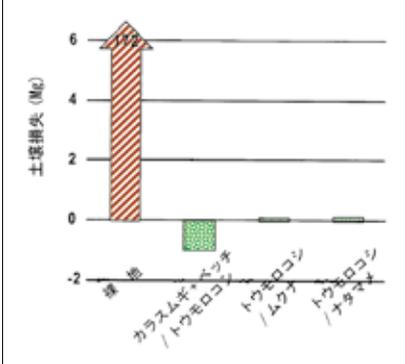
Source: Pereira, 1998, 2001.

土壤侵食減少および水質改良

土壤が植生、マルチ、作物残渣等で覆われることが少ないほど、土壤は雨滴の衝撃に曝されることが多くなる。雨滴が裸の土壤に当たると速度エネルギーが一つひとつの土壤粒子を土壤塊から分離する。これらの粒子は土壤表面の穴を詰まらせ表面で多くの薄い浸透し難い表面皮殻(surface crust)と呼ばれる堆積物の層を形成する。それらは数mmないし1cmあるいはそれ以上にわたるが、通常砂が微砂粒子から出来ている。これらの表面皮殻は雨水が土壤断面中へと通過するのを妨げ、その結果表面流去水を増加させる。この土壤団粒の雨水による小さい粒子への破壊は、団粒の安定性に依るが、安定性は大部分有機物含量に依存している。

DebarbaとAmado(1997)によると、カラスムギとベッチ/トウモロコシ栽培体系の場合、土壤被覆が増加すると土壤侵食は土壤の再生速度近くまであるいはそれ以

第16図 種々のトウモロコシ栽培体系における水侵食による土壌損失



Note: Corrected with soil regeneration = 1.7 tonnes/ha/year.
Source: Debarba and Amado, 1997.

下に減少し得る（第16図）。

土壌侵食は表面水溜めを堆積物で充たし、その貯水容量を減す。堆積はまた湿地の緩衝力と濾過能力および氾濫原の洪水調節能力を低下させる。地表流水中の堆積物は水力発電施設やポンプの損耗を増し、維持管理費用を嵩ませ、タービンの交換回数頻度を上げる。堆積物は海へ達することもあり（写真23）、魚、貝や珊瑚に危害を与える。侵食を受けた土壌は、肥料、殺虫剤、除草剤等潜在的に有害な遠隔影響源のすべてを含んでいる。

土壌がマルチによって保護されているときには、水は表面を流去するより多く地中に浸透する。このことは河川が表面流去によるよりもむしろ地下流によって涵養されることを意味する。この結果、地上水（surface water）は侵食と表面流去が優勢な地域と較べてより清浄でより地下水に近い水質をもつことになる。浸透が大きいと土壌中の貯水量を増やし洪水を減らして河川への放出を緩慢にする。また増加した浸透は地下水の充填を改善して井戸への供給を増大する。

Bassi (2000) は、ブラジル南部の異なる集水域で、十年間（1988-1997）に亙る間の水濁度と堆積物濃度の顕著な減少を報告した。この減少は、各地方で優勢な土壌型によって、50ないし80パーセントの間を変動した。これらの減少は丘陵地で永年性作物（バナナおよび放牧地）を植栽する率が増加したことによるもので、それによって侵食能が減少したためである。全堆積物損失は16パーセント、肥料の費用は21パーセント減少した。これは侵食された土壌に伴う肥料の損失を示している。

Guimarães, Buaski と Masquero (2005) はある特定の集水域について同様の効果を示している。パラナ、リオデカンポ集水域は、357,000の都市人口の町カンポモラウンへの給水の80パーセントを提供していた。ここで1982-1999期に水濁度の顕著な減少が観測された（第17図）。



写真23
豪雨直後の表面流去水と土壌損失
マラウイ、ゾンバマウンテン、ナイシ集水域

地上水中の堆積物および溶解した有機物は飲料水供給域から取り除かなくてはならない。侵食を減じ懸濁している土壌粒子を減少すると水処理費を減らすことになる。ブラジルのChapecóからのデータ

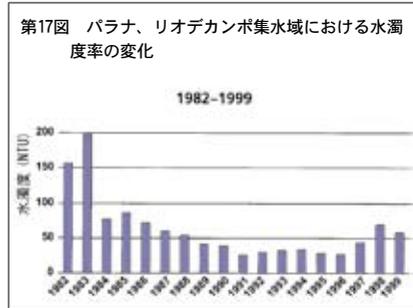
によると、浮遊懸濁固体に対して使われる硫酸アルミニウムの量は5年間で46パーセント減少した。水が病原生物を殺すため塩素処理されるとクロロフォルムのようなトリハロメタン（THM）化合物を生じる。THMは癌を発生させる疑いが持たれている（Fawcett, 1997）。表面流去水と侵食の減少は塩素処理の間のTHM類の生成を減らすことになる。

侵食は植物生育および落葉落枝還元に対する影響を通して永続的な二次的影響をもたらす可能性がある（Gregorichら、1998）。侵食が生産性を上回ると有機物の補給を制限し、有機物量は長期的には螺旋状に下降する（spiral downwards）可能性がある。

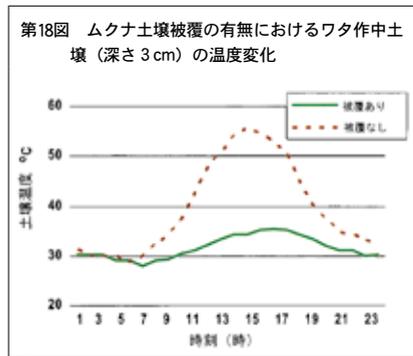
土壌被覆は土壌を雨滴の衝撃から保護し蒸発による土壌からの損失を妨ぎ、その上日光の加熱効果から土壌を護る。土壌温度は植物による水と養分の吸収、発芽および根の発達、更に土壌微生物活性や土壌の皮殻形成、硬化へも影響する。

根は最高35℃までは土壌温度が高いほどより多くの水を吸収する。さらに高温になると水吸収は制限される。熱帯の多くの地域では、高すぎる土壌温度が作物生産に対するひとつの主要な制約である。5 cmの深さにおいて40℃また1 cm深さで50℃を超える最高温度というのは耕起土壌で生育期に普通に観察され、時には70℃の極限にまで至る。そのような高温は実生の発達や作物生育に対してのみならず微生物相の生育および増殖に対しても好ましくない影響を及ぼす。発芽と実生の生育に理想的な根圏温度は25℃ないし35℃の範囲にある。諸実験は、35℃を超える温度はトウモロコシ実生の発達を劇的に減少させ、40℃以上の温度はダイズ種子の発芽を殆どゼロにすることを示している。

作物残渣マルチあるいは被覆作物は土壌温度を調節する。土壌被覆は太陽エネルギーの大部分を大気中へ反射し返し、それ故土壌表面温度を下げる。これは無マルチ土壌に比べて被覆区の最高土壌温度を下げ（第18図）、変動を減らす結果を生む。



Source: Guimarães, Buaski and Masqueto, 2005.



Source: Derspsh, 1993.

第6章 持続的食糧生産（Sustained food production）の重要な要因

作物生産性の向上

作物の生産性は、有機物と緊密に関連している（BauerとBlack, 1994）。従って変動する有機物を持つ領域は通常、生産性の変動をも示す。通気性の良い土壌で育つ植物は早魃あるいは過剰水による圧力をあまり受けずにすむ。緊密化の低い土壌では、植物根はよく張ることができ、容易に繁茂する。高い有機物含量は生産性を増し、翻ってみれば高生産は有機物を増加させる。

施肥効率の向上

西アフリカのサバンナおよびサブサハラアフリカ（SSA）の亜湿潤および半乾燥地域における二つの主要な土壌肥沃度上の制約は、低い生来の栄養保有と低緩衝力すなわち低陽イオン交換容量の結果、連続的耕作で進む急速な酸性化である（JonesとWild, 1975）。一般にこれらの制約には化学肥料や石灰を施用することで対抗してきた。しかし脊薄化した土壌への無機質肥料施用はしばしば期待した効果を与えることに失敗した。これは基本的に低有機物と土壌中の生物学的活性が低いことによる。

有機物の化学的および栄養的益は、植物養分の循環および栄養素を供給する土壌の能力に関連している。有機物は植物養分を保持し、それらが土壌深層へ溶脱するのを抑制する。微生物は有機物の分解を通じN,PおよびSを無機化したり同化する働きをしている（Duxbury, SmithとDoran, 1989）。このようにして、微生物は植物栄養の緩慢かつ連続的な放出に寄与している。植物によって吸収されない有効栄養素は土壌生物によって保持される。有機物に欠乏した土壌においては、それら栄養素は溶脱と表面流去によって系から失われる。

リン酸固定と非有効性は、大量の遊離鉄およびアルミニウム酸化物を含む酸性土壌においては、主要な土壌肥沃度制約要因である。表土および下層土の土壌試料を比較して、UeharaとGilman（1981）は土壌有機物がそのような土壌のP吸収容量を減らせるという間接的な証拠を提出した。これが意味するものは、高いP固定能をもつ土壌、例えば火山性および苦鉄質岩石に由来する酸化物に富む土壌に関しては、表層に石灰で飽和した土壌有機物を大量に集積し維持することができる管理法が有機物および肥料起源のP有効性を高められるということである。

腐植の有機酸のような弱酸はその水素（H）を容易に解離することがない。Hは酸性条件下で腐植カルボキシル基の一部である。土壌が石灰を施用され酸性度が減少するとき、 H^+ は腐植酸から除去されヒドロキシル（ OH^- ）と反応して水となる傾向が大きくなる。腐植上のカルボキシル基は正荷電の H^+ が除去されると負荷電を発達させる。土壌のpHが高くなると、カルボキシル基からの H^+ 解離はpH上昇を緩衝し

同時にCEC（負荷電）を生ずる。有機物が増加するとき土壌は自然の緩衝力を回復し、これは酸性土壌のpH上昇を意味する(第19図)。

CECは土壌の有機物含量と密接に関連している。それは有機残渣が残っているところでは先ず表土で後にはより深い層で時と共に徐々に増加する。Crovetto (1997)は、残渣を保持し20年後表土で腐植が増えるに従ってCECの136%の増加があったと報告している。酸性度を克服するため、石灰は通常土壌中に鋤き込まれる。しかし土壌表面の有機物は炭酸カルシウム（石灰）が表面施用されても深い土層への移動を助ける（第6表）。

作物残渣は有機酸を出して石灰の断面中への浸透を、裸地に施用した場合よりも速やかに起こす。それ故、石灰を土壌中に集中的に混合する必要はなくなるが、このことは低いし不耕起に基づく農法に当てはまる。

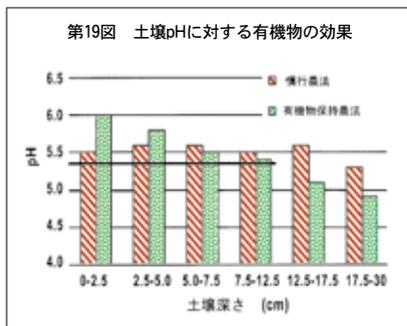
停滞水（water logging）の減少

第5章は改良有機管理法の下での土壌の貯水容量を検討した。しかし、水停滞の場合にもまた有機物は重要な役割を演ずる。大動物相の生攪乱活動は土壌中に種々の導通性大孔隙（conduction macropores）を残し、それらが深層への排水を受け持つ。

Chanら（2003）は3年間の不耕起の後、慣行耕作に比し、顕著な水停滞の減少を認めた。この減少は導通性大孔隙が高密度にあることと関連しており（それぞれ不耕起および慣行耕起法に対し140/m²および5/m²）、またミミズ密度が高い（それぞれ不耕起および慣行耕起法に対し240/m²および36/m²）ことと関係していた。

収量の増加

栄養の循環とりわけ無機化および同化に影響を及ぼす農法は直ちに生産性の得失を



Note: Original pH level was 5.3.
Source: Milecizuk, 1996.

第6表 石灰施用後同期間における異なる土壌被覆下の土壌断面内石灰の分布範囲

被覆	土壌深さ (cm)
裸地	0-7
クロカラスミギ	0-20
オイルラディッシュ	0-22



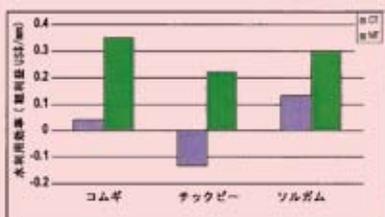
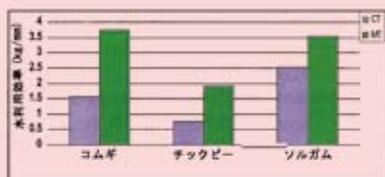
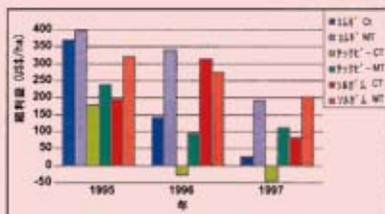
写真24

不耕起条件下では、土壌の内部孔隙系は地拵え作業で破壊されることなく雨水を地表から深層（左）へと排水できる。裸地では雨滴の衝撃で表面の孔隙は閉塞され、排水不良となる。

ボックス8 改良有機物管理法は引き合うか？

農場の賃貸可能性を計算するにはいくつかの方法がある。一般には、支出、収入、収量、生産経費および粗利益を用いて、農民達が如何に巧みに一定の利益を得るために努めたかを分析する。しかし、水が制限因子となっている地域では、水の収量あるいは現金への変換を分析することが有益である。次の例は、農場の成果およびその栽培体系を比較する異なった方法を示している。これはオーストラリアの作付面積60,000haを有する16農場の栽培実績に基づいている。その面積の三分の一は、集約的耕作法（CT）で、火入れおよび雑草防除のための数回の除草剤散布により栽培された。三分の二は、できるだけマルチ被覆を残し、土壌の有機物含量を改善する目的を持って、特殊な播種機を用い、雑草制御には除草剤を使用して保全農法として知られている方法（MT）によって栽培された。三年間の作付けデータの分析で、三作物輪作（コムギ、チャックビーおよびソルガム）に対する以下の粗利益を示した。

しかし、農法の成果を比較する手段として水利用効率(WUE)を使うと結果はさらに顕著であった。この場合には、季節を休閑と作付け期間に分けてWUEを計算する通常の方法ではなく、全水利用効率因子を用いた穀物収量と粗利益の両方を全水で割って、農民達が、水を収穫と現金に変換するために如何に巧みに努力したかを1997年に計算した。



Source: Rumery and Coleman, 1999.

ひき起し農業体系の経済に反映される。

土壌有機物含量の高い系における作物収量は、低有機物量の土壌でのそれに比して、変動が少ない。これは土壌の諸性質と微気象の有益な条件の安定化効果による。

作物の生育と強さの改善は直接的結果と間接的效果による。直接効果は上記のように栄養および水含量の改善によるものである（ボックス8）。間接効果は有利な根環境雑草抑制と病虫害の減少である。

窒素（N）の同化は作物残渣管理系、とりわけ残渣のC:N比が高い（頑丈で木質）系、で起こる。これはトウモロコシ収量の減少をひき起す。コムギやダイコンの残渣を地表に保留してNの同化を起こした事例では、N肥料の施用によって克服された。これらのデータによれば、トウモロコシは、冬の被覆作物として（肥料なしで）カラスムギ、ルーピンおよびウマゴヤシを伴った場合には、慣行耕起と90kg/haの施肥処理をしたものと比べて、匹敵するかより高い収量を得られた。この場合収量増は葉のP含量および土壌のP有効性と高い相関があった。これはマルチ層下が高水分含量で

あり、そのことが植物根による高いP吸収に導いたことによると解釈された。
 穀作物はまた残渣中の化合物の分解を通じ互いに残留効果を持つことがある。

除草剤および殺虫剤の削減

ある人々は低および不耕起の集約系では除草剤使用が増え、ひいては除草剤による水汚染を増大させるのではないかと心配している。Fawcett (1997) によるとアメリカ合衆国の除草剤全使用量は不耕起法の採用期間に減少した。彼は除草剤は重要であるが、慣行耕作法を採用している農民達は不耕起の農民と同じ位の量の除草剤を使っていると結論している。

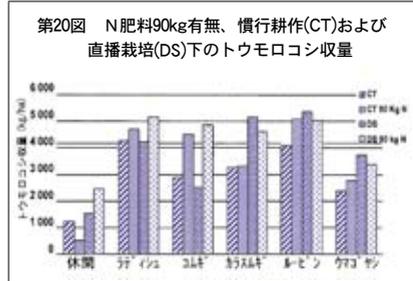
ホンジュラスにおいては除草剤使用の強い減少傾向が認められている(第21図)。整地前に火入れをしない農民達はもはや除草剤に以前よりも現金を費やすことはない。クエズングアル法を採用している農民は、整地費と全費用において、除草剤には僅かしか支出せず貯金をしている。良く管理された不耕起栽培系では除草剤の必要性が次第に減少していることが明らかになっている。その主たる理由はこの体系は次のふたつの共力作用 (synergy) によって土壤中に存在する種子貯蔵量を減少するためである：開花と結実の回避により新しい種子生産が減少する；耕起により表面にもたらされる種子が減少する。

種子直播では雑草種子の貯蔵は慣行耕作法とは次のような理由で異なる：

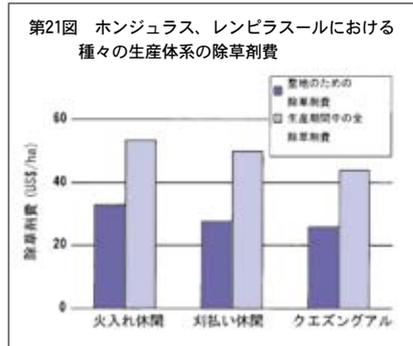
- 雑草種子は土壌表面に残るが、そこでは種子は昆虫、鳥、土壌生物による攻撃に曝され、大気の影響を受け易い。
- 土壌は残渣に覆われたままになり、日光が種子に当たることを妨げ発芽を減らす。
- 既にある深さにある雑草種子は表面にもたらされず発芽することができない。
- 永年性雑草は機械によって再分配されない。

これらの結果、土壌の雑草種子の貯えは時と共に縮小し、その結果雑草問題も縮小して、除草剤を使う必要はなくなる。

表土層における土壌有機物濃度は除草剤の吸着に重要な役割を演ずる。表土の有機



Source: Calegari, 1998.



Source: CDR, 2000.

物濃度が減少すると環境の除草剤汚染は増加することがある。高レベル有機物は殺虫剤の吸着を増し、分解の遅延を伴う。ほかの殺虫剤と同様、除草剤は微生物が摂食する基質として使われる (Haney, Senseman と Hons, 2002)。除草剤は土壌あるいは水中で微生物により酸、アンモニア (NH_4)、アミノ酸、炭化水素、リン酸塩および二酸化炭素 (CO_2) へと分解される (Schuette, 1998)。微生物は殺虫剤のより急速な分解をひき起こす故に、微生物活性の増進は殺虫剤の溶脱を減少させることができる。

低耕起栽培で最も良く使われるグリフォセイトやパラコートを含め多くの除草剤は静電気力や水素結合によって粘土や有機物に緊密に結合される。ひとたび土壌有機物に結合すると除草剤は不活性になり、もはや植物に影響を与えることはない。その上それらは土壌中では金属と不溶性の複合体を形成する。この反応は土壌中での除草剤の安定化と地下水への溶脱の低下に寄与する (Ahren, 1994a, 1994b)。幾つかの研究はグリフォセイトが環境に対し何らかの予期せぬ危害を与えると信ずる理由はないことを示している (Torstenson, 1985)。他の研究は土壌生命あるいはその機能に対する負の影響を示している。

土壌有機物含量を増す農法 (例えば不耕起) は除草剤による環境汚染の可能性を低下させる。

生物多様性 (biodiversity) の増大

慣行的農業は地上および地下の多様性を減少させる。その結果それは植生構造、被覆および景観に著しい変化をもたらしてきた。森林および放牧地から作付地への転換の間の植生の変化は、植物、動物および微生物に影響する。一定の植物種 (食料あるいは繊維作物、草地および飼料作物、あるいは樹種作物) や家畜種の特殊化が進められることによって、ある機能、例えば栄養素循環および生物学的制御など、が著しく影響されることがあり得る。若干の収穫されない種すなわち随伴種はその変化から利益を得、厄介者になる。他方、多くの生物は完全に消滅するかあるいは数が劇的に減少させられる。例えばもし適当な棲息地を保全するよう努力が払われない場合、授粉者昆虫や有益な捕食者の数の減少や絶滅がおこる (ボックス 9)。

随伴種はある程度努力して維持できる。適当な作物輪作、作物一家畜相互作用および土壌被覆の保全によって、害虫を捕食する多数の種に棲家を造り出すことは可能である。それらの管理により、多くの昆虫、鳥およびその他の動物をひきつけることが可能である。このように輪作、および作物と被覆作物と生垣あるいは圃場境界 (作物) の組み合わせなどは生物学的多様性および生態学的機能を増進する。土壌生物の多様性の複雑さと豊かさの故に、作物および放牧地管理の効果は現在のところ完全な理解には至っていない。しかしながら、ある機能的グループおよび特定の土壌機能は、農業生産性と系の持続可能性のために不可欠なことが次第に認識されつつある。

土壌は、もし攪乱があまり劇的ではなく回復に充分の時間が与えられるならば、そ

ボックス9 異なる耕作法がフンコロガシ幼虫の穴およびその体積に及ぼす影響

ブラジル南部において、自然の草地および森林を農業地域に転換する以前には、土壌中には多くの種類のフンコロガシとその幼虫（白い地虫）が生息していた。

これらの地域の転換に伴って、この甲虫のあるものは姿を消したがあるものは適応し、生物農薬が存在しないこともあって重大な土壌生息性害虫となった。しかしながら、条件的害虫と考えられる他の種類（のフンコロガシ）がいる。その幼虫たちは表面の落葉落枝が十分に無いときには害虫となる。例えば *Diloboderus* および *Bothynus* 属のようなものである。これらの大きな甲虫は、耐久性のある大きく細長い部屋（穴）を土壌中に1mあるいはそれ以上もの深さに掘って、その生涯の大部分をそこで過ごす。これらの穴が水の浸透や根の生長に好都合な通り道となり、さらにその空間は土壌肥沃土の高まった場所ともなった。これらの部屋や長い細い回廊は他の多くの土壌生息性無脊椎動物や微小動物相のために一時的あるいは永久的な隠れ家を提供している。

研究によって不耕起（NT）の下では、甲虫の幼虫の穴数（8.8-9.6/m²）がより多いことが明らかになった。最大および最深の穴もまたNT（直径33.5mmおよび深さ117cmまで）で発見された。その結果、NTに開けられた孔隙の全容積（450-503cm³）はCT（53-107cm³）のおよそ10倍にも達した。

Source: Brown et al., 2003

の生命維持過程を回復する能力を持っている。有機物と土壌生物の生物学的多様性はその回復の原動力である。土壌生物の数および型と利用できる基質（有機物）の減少は弾力性の低下へと導き、ひいては劣化の下降螺旋に落ち込んでゆく可能性がある。

弾力性（resilience）

弾力性とはある系が攪乱の後に回復する能力として定義されている（ElliotとLynch, 1994）。土壌弾力性は回復過程と衰退過程間の釣り合いに依存している。弾力性に影響する要因は二つの範疇に分けられる：内因的および外因的、である。内因的要因は内在する土壌の諸性質（根張り深さ、粒径組成、構造、地形および排水）と微および中気象に関連している。外因的要因は土地利用、農法、技術的改良および投入管理を含む（Lal, 1994）。それ故適当な農業行為は土壌弾力性を増す要因に影響を与えることができる。

有機物と土壌生物は土壌弾力性に関連する土壌の諸性質を保全し改良する上で重要な役割を演ずる。生物学的活性によって、より多くの孔隙を造りだすことに加えて、有機物は有機物と無機土壌粒子の間の結合による土壌団粒の形成および安定化に重要な役割を持っている。土壌団粒化は二つの結合剤を通して起こる：

- 細菌の廃棄生産物—多糖類；
- 糸状菌と細菌の菌糸。

団粒安定性の保全は表面閉塞を減じ水浸透速度を増大するために重要である（Whitebread, LefroyとBlair, 1998）。安定性の増加により、表面流去水は減少する（Roth, 1985）。

第7章 有機物の還元および炭素の隔離における保全的農業の役割

保全農業の原則

保全農業 (conservation agriculture) は、環境への害を減らし有機物と栄養素を供給するため、土壌の過度の攪乱を減少しまた土壌表面へ作物残渣を維持するのに生物学的活性および作付け体系を利用する。それは四つの原則に基づいている：

- 主として直播による最低限の機械的土壌攪乱；
- 作物残渣および被覆作物の維持による永年の土壌被覆、有機物供給；
- 土壌断面の生物学的制御および効率の利用；
- 最低限の土壌圧密。

これらの原則は（最低限の土壌攪乱を除いては）新しいものではないが、それらが保全農業に意識的に適用されるとき積極的な結果を生ずる。全ての農法（最低限耕起、土壌被覆および作物輪作）は共働効果と付加価値を目指して結合される。過去には農民達は被覆作物および不耕起を試みては、雑草問題または収量低下故にそれらを放棄した。生物学的病虫害および栄養吸収のためには雑草防除と輪作の改良も必要である。保全農業の原則を総合することが人と環境の両方にとって好ましい状況を生み出し、そのことが保全農業の下にある地域の世界的な拡大に作用した。

保全農業が目指すものは：

- 根域に最適条件（作物根に最大可能深）を与え維持する。その目的は根を生長させかつ植物栄養と水の獲得を妨げることなく効果的に機能させることである。
- 水が土壌に入ることを保証する。その目的とするところは(i)植物がその生長能力を発現するに十分な水を供給する；(ii)過剰な水は土壌を通過し地下水と河川流に流れ、侵食を起こすようなところでは表面流去水として地表を流れない。慣行法以上の水を土壌断面中に保持し、作物栽培の効率を上げる可能性を高める；
- 土壌中における有益な生物学的活性を増大する、その目的は(i)土壌断面内の水浸入および分布を増すため土壌構成 (soil architecture) を維持再建する；(ii)潜在的土壌病原体と対抗する；(iii)有機物の土壌有機物および様々な段階の腐植への分解に貢献する；および(iv)植物栄養素の捕捉、保持や緩慢な放出に寄与する；
- 根および土壌生物に対する物理的あるいは化学的損傷が効果的機能を妨げぬよう回避する。

有機物の残留

不耕起による土壌攪乱の減少、被覆作物の利用および土壌表面への作物残渣の保留は土壌の活性増加と表層土における有機物の蓄積をひき起す（第22図）。

保全農業に関する議論でしばしば聞かれる主張は、それは湿潤および亜湿潤熱帯で

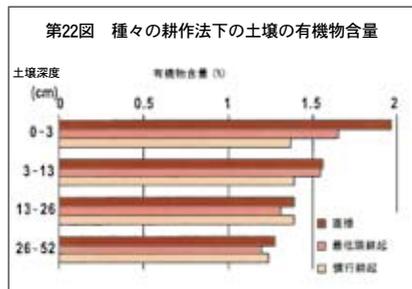
のみ実行可能であり、半乾燥地域においては不十分なバイオマスの生成が保全農業を開始するには制限要因である、というものである。しかし、最近の研究は、モロッコの半乾燥地域でさえ保全農業の原理の適用は実を結んでいることを示した。Mrabet (2000) は、より良い水利用と改善された土壌の質により、より高い収量があったと報告している；後者（土壌質の改善）は土壌有機CおよびNの増加と種子圏における若干のpH低下である（BessamとMrabet, 2003; Mrabetら、2001a, 2001b）。

炭素隔離 (carbon sequestration) の増加

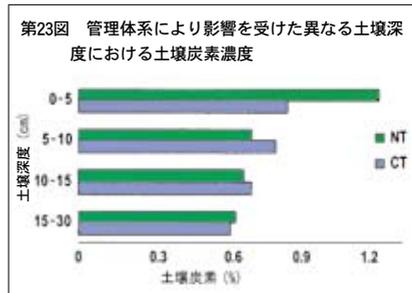
世界の土壌は活性な炭素 (C) の重要な貯蔵庫 (reservoir) であり地球上の炭素循環に主要な役割を演じている。土壌は、土地利用と土壌および植生の管理によって、大気二酸化炭素 (CO₂) の源 (source) にも溜り (sink) にもなり得る (Lal, 2005) (第23図)。天然の生態系（例えば、森林、草地および湿地）の農業用への転換、および植物資源の連続的収穫は植物バイオマスとCの顕著な損失をひき起こし、その際大気CO₂水準を上昇させる (DavidsonとAckerman, 1993)。特に耕作前の農地の火入れは土壌有機物含量に悲惨な影響を及ぼす。第24図は100年間作物残渣と雑草を燃やした後農地の土壌有機炭素の減少を、同期間火入れをしなかったか鋤耕した地域と比較している。火入れをしなかった地域と比べると、火入れ区表土層 (0~5cm) は最大の炭素の減少 (36パーセント) を示した。同じ層の土壌N貯蔵は16パーセントの減少であった。炭素貯蔵は火入れのみならず、全体的な土地利用管理によって、殊に単作が行われて種の多様性が顕著に減退することによっても、減少する (Amadoら、2005)。

第7表は土壌が大気CO₂の溜りあるいは源の何れになるかを決定する一般的な人間活動を示している。

第7表に示されるように、土壌は大気のCO₂水準を軽減する役割を果たすことができる (Paustian, 2002)。この大気CO₂取込みの過程は自然に且つ極めて効果的に光合成によって行われる。



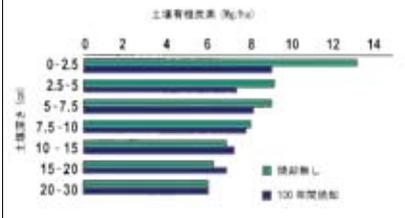
Source: FAO, 2002.



注：慣行 (CT) および 保全 (NT) 農業、2完全作付け循環 (4年) 後。

Source: Prior et al., 2003.

第24図 隔年に一度の作物残渣焼却が土壤炭素蓄積に与える影響



Source: Spagnolo, 2004.

は、C投入（作物残渣、落葉落枝等）がC支出（収穫物、土壤呼吸、燃料および肥料製造者からのC放出等）を超過することによって、大気CO₂の正味の除去（net removal）があるときに起こる（IzaurrealdeとCerri, 2002）。土壤Cを増加する管理法は持続的農業の次のような原則を遵守するものである：減耕起、侵食制御、多様な栽培体系、釣合いの取れた施肥等。

不耕起法の初めの数年間は、土壤有機物含量は、残留根の分解と地表の植物性残渣のために、増加する。この有機物はゆっくりと分解し、それ故Cの大気への放出も徐々に起る。全体の釣合いでは正の固定すなわちCの正味の固定または隔離（net fixation or sequestration）が起こる；この土壤は正味のCの溜りである。

第25図はある作付体系はCO₂の溜りとして働くことを表している。この例では天然植生下の土壤の炭素蓄積が対照として用いられている（定常状態：ΔC=0）。8年間で、休閒/トウモロコシ区はヘクタールあたり4.3トンのCO₂を放出した。トウモロコシ/ムクナ区は、休閒/トウモロコシ区に比べると、ヘクタールあたり約20トンの正の釣合い（positive balance）を示し

生きている植物は日光と水の存在下に空気からCO₂を取り入れ、それを変換して種子、葉、茎および根に配分する。CO₂の一部は分解に際し、Cとして土壤中に保留され、すなわち“隔離され”（sequestered）、貯蔵される（stored）。

特に多量の作物残渣添加および不耕起に基づく体系は、大気中に失われる量より多くCを貯える傾向がある。

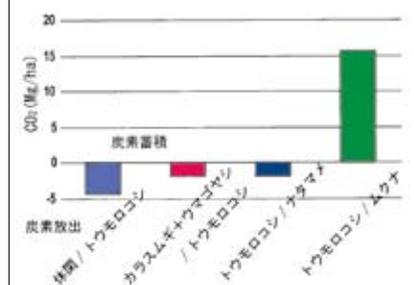
管理されている土壤における炭素隔離

第7表 土壤が大気CO₂の溜めとなるか源となるかを決定する土地利用および土地管理

CO ₂ 源としての土壤	CO ₂ 溜めとしての土壤
土壤の性質：粘粒質土壤、排水過剰、高い浸透感受性	土壤の性質：粘土質土壤、排水不良の生態系、斜面下部を含む種地
土地利用：単粒性作物、単純生態系、浅い根系および低い種/地上部比	土地利用：永年性作物、多粒生態系、深い根系および高い種/地上部比
土壤管理：肥料に基づく集約的耕作、負の栄養的釣り合い、雑草除去及び/又は傾斜、連続的集約、表面流水及び/又は運搬による土壤と水の損失	土壤管理：不耕起、正の栄養的釣り合い、マルチ農法、耕作管理における雑草抑制物、土壤と水の保全

Source: adapted from Lal, 2005.

第25図 ブラジル南部において自然植生と比較した直播・被覆作物共存の種々のトウモロコシ生産体系下のCO₂放出および蓄積の評価（8年間の累計）



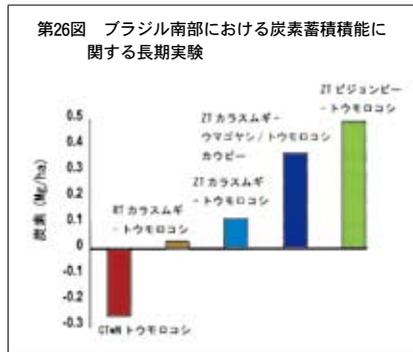
Source: Amado et al., 2001.

た。天然植生下の土壌と比較すると、これは8年間に15t/ha以上の大気CO₂の捕獲を意味する。Lovato (2001) は、カラスムギーコモンベッチ/トウモロコシーカウピーの輪作体系中で13年間に2トン/ha/年の増を見出した。これらの数字は保全農業の炭素隔離の潜在力を確認している。しかし土壌耕起から不耕起への“単純な”転換では充分ではない。Lovatoら (2004) によれば、土壌有機物を安定水準に維持するためには、栽培体系では最低植物残渣中炭素4.2トン/ha/年の添加、放牧と作物の混合体系であれば4.5トン/ha/年の添加 (Nicoloso, LovatoとLanzanova, 2005) が必要である。これらの値以下ではCO₂放出が起るあるいは起る可能性があり、それ故に保全農業法が炭素隔離に成功するためには、輪作体系の中に大量のバイオマスを加える作物および放牧場を含めることが必要である。

輪作体系にマメ科被覆作物を加えることによって更に多くのCを貯えることができる。これはブラジル、リオグランデドスルにおける長期実験に基づいて、第26図に示されている。マメ科植物は土壌にCを添加するのみでなく、土壌に相当量のNを加え、次の作物のバイオマス増加をもたらす。

平均炭素蓄積0.5トン/ha/年と仮定すると、ブラジル南部 (リオグランデドスル、サンタカタリナおよびパラナ) の保全農業のような地域は年々500万トンのCを取り込む潜在能力があり、これは大気CO₂1,800万トンに相当する。比較の為、ブラジルは2000年に8,400万トンのCO₂の放出があったと推定されている (Carbon Dioxide Information Analysis, 2003)。

最近の研究は、土壌温度はCO₂放出に影響する主たる気象要因のひとつであることを示している。高い土壌温度は土壌呼吸を加速しCO₂放出を増加する。これはある地域における景観および土地利用に対する示唆を与える。凸斜面および丘陵頂部における放出は、温度が通常低い麓部よりも高いのである。前述のことは、土壌を植生で保護する (土壌温度の低下) ことが土壌と水に対して重要であるのみならず、温室効果ガス放出を減らす観点からも土壌を被覆することが賢明であることを示している。



注：CT=慣行耕起、RT=減耕起、ZT=不耕起、
CT+M=慣行耕起+施肥、ZT+M=不耕起+施肥
Source: Adapted from Amado et al, 2005.

第8章 結論

土壤有機物水準の維持と栄養循環の最適化は農業系の生産性維持のためには不可欠である。この両方が大動物相の生擾乱活性および微生物的に駆動される異化と同化の過程（これらもやはり大きな無脊椎動物によって促進されるのだが）と密接に関連している。土壤有機物含量の維持は、添加と分解の速度間の釣合いを要求する。農法の変化は土壤有機物の貯蔵量および回転速度双方に顕著な変化をひき起すので、それらの性質と影響の分析が重要である。

世界的に作物生産は、一般的に、土壤有機物の水準の減衰従って土壤肥沃度の衰退をひき起こしている。草地や森林用地を耕地農業に転換すると土壤断面に元来あった有機物Cの約30パーセントの損失をひき起す。確実な水供給のあるかなり肥沃な土壤では、長期の耕地農業体系の収量は充分量の肥料とその他の土壤改良剤を施用することによって高水準に維持されている。低投入（low-input）農業体系では、収量は栄養と土壤有機物水準が衰退すると急速に低下する。しかしながら、休耕地の使用、作物一家畜—アグロフォレストリーおよび作物輪作によって回復は可能である。

伝統的な撥土板プラウ（mould-board plough）およびディスク耕作（disc-tillage）体系では、土壤有機物の急速な分解をひき起し、土壤を風雨食に対し敏感にし、耕起深度の下に鋤犁盤（plough pan）を形成する傾向がある。対照的に、低または不耕起体系では表面残渣をより多く残し、土壤活性増大に好都合な環境を提供し、攪乱を受けず相互に連続した多くの大孔隙と多数の土壤団粒を維持するが、それらは雨滴の衝撃によく耐える。水は、低耕起により土壤中に直ちに速やかに浸透するが、このことが土壤を侵食から保護する。その上、有機物分解は低耕起系ではより緩慢に起こる。不耕起系は土壤有機物を維持増加するために役立つことが証明されている。

作物輪作は直播体系の持続可能性のための基礎である。被覆作物、N固定のためのマメ科作物、作物輪作および不耕起を含む生産体系は地域的に適応させることが可能であり、従ってその地域の土壤管理の維持に貢献する。降雨が非常に強かったり、反対に水不足によってバイオマス管理の選択が制限されているところでは、侵食の危険が高い期間、作物の樹冠あるいは作物残渣による土壤表面被覆の維持は不可欠である。土地管理法の改良によって、少なくとも有機物損失の一部は回復することができる。不耕起系での土壤有機物増加は農耕地土壤を炭素貯蔵庫に変えることもできる。

不耕起系における活性有機物画分が比較的低水準であることは、そのような系が作物残渣による表面保護の維持に大きく依存している事実を浮かびあがらせている。被覆作物と作物残渣等による残渣蓄積はいくつかの栄養素および土壤有機Cの水準を増加させる。有機物の活性画分は団粒の安定性と降雨の浸透に重要な役割を演じている。天水作体系（rainfed cropping system）における活性C水準の構築は、単に不

耕起体系に変えること以上に、表面皮殻を減少し、降雨浸透能力を改善するのに大きな影響をもつ可能性がある。C投入を最大化し活性C比率を維持するように設計された管理法はより持続性の高い作付け体系への不可欠な段階と見做される。

被覆作物 (cover crops)、間作 (inter cropping) および輪作 (crop rotation) は、土壌表面下においても地上部においても生物的多様性を増進する助けとなり得る。この多様性は良く機能し安定した生態系を維持するのに重要である。多くの異なる型の生物が共存するところでは、病害、昆虫、線虫による問題が少なく；種間の競合に富み、多くの型の捕食者が繁殖する可能性が高いと言える。その様な状況下では単一の有害な生物が作物収量に深刻な影響を与えるほど増え続けることはないのである。

参考文献

- Ahrens, W.A. 1994a. Glyphosate. In: *Herbicide handbook*, pp. 149–152. Seventh Edition. Weed Science Society of America.
- Ahrens, W.A. 1994b. Paraquat. In: *Herbicide handbook*, pp. 226–228. Seventh Edition. Weed Science Society of America.
- Amado, T.J.C., Bayer, C., Eltz, F.L.F. & De Brum, A.C.R. 2001. Potencial de culturas de cobertura em acumular carbono e nitrogênio no solo no sistema plantio direto e a consequente melhoria da qualidade ambiental. *Rev. Bras. Ciên. Solo*, 25:189–197.
- Amado, T.J.C., Lovato, T., Conceição, P.C., Spagnollo, E., Campos, B. & Costa, C. 2005. O potencial de sequestro de carbono em sistemas de produção de grãos sob plantio direto na região sul do Brasil. In: *Simpósio sobre Plantio direto e Meio ambiente; Seqüestro de carbono e qualidade da água*, pp. 63–71. Anais. Foz do Iguaçu, 18–20 Maio 2005.
- Balota, E.L. 1996. Alterações microbiológicas em solo cultivado sob plantio direto. In R. Trippia dos Guimarães Peixoto, D.C. Ahrens & M.J. Samaha, eds. *Plantio direto: o caminho para uma agricultura sustentável*. Palestras do I Congresso Brasileiro de Plantio Direto para uma Agricultura Sustentável. Ponta Grossa. 275 pp.
- Bassi, L. 2000. *Impactos sociais, econômicos e ambientais na microbacia hidrográfica do Lajeado São José, Chapecó, SC*. Estudo de caso. Florianópolis, Brazil, EPAGRI. 50 pp.
- Bauer, A. & Black, A.L. 1994. Quantification of the effect of soil organic matter content on soil productivity. *Am. J. Soil Sci. Soc.*, 5: 185–193.
- Bell, M.J., Moody, P.W., Connolly, R.D. & Bridge, B.J. 1998. The role of active fractions of soil organic matter in physical and chemical fertility of Ferrosols. *Aust. J. Soil Res.*, 36: 809–819.
- Bell, M.J., Moody, P.W., Yo, S.A. & Connolly, R.D. 1999. Using active fractions of soil organic matter as indicators of the sustainability of Ferrosol farming systems. *Aust. J. Soil Res.*, 37: 279–287.
- Bessam, F. & Mrabet, R. 2003. Long-term changes in particulate organic matter under no-tillage systems in a semiarid soil of Morocco. In: *Proc. 16th ISTRO Conference*, pp. 144–149. 13–18 July 2003, Brisbane, Australia.
- Blair, N. & Crocker, G.J. 2000. Crop rotation effects on soil carbon and physical fertility of two Australian soils. *Aust. J. Soil Res.*, 38: 71–84.
- Blair, G.J., Lefroy, R.D. & Lisle, L. 1995. Soil carbon fractions based on their degree of oxidation, and the development of a carbon management index for agricultural systems. *Aust. J. Soil Res.*, 46: 1459–1466.
- Blair, N., Faulkner, R.D., Till, A.R. & Prince, K.E. 2003. The impact of plant residues with different breakdown rates on soil carbon and soil structure. In: *Proc. 16th ISTRO Conference*, pp. 175–181. 13–18 July 2003, Brisbane, Australia.
- Brammer, H. 2000. Ploughpans and tillage problems. In: *Agroecological aspects of agricultural research in Bangladesh*, pp. 151–158. Dhaka, UPL.
- Brito, L.F., La Scala Jr, N., Merques Jr, J. & Pereira, G.T. 2005. Variabilidade temporal da emissão de CO₂ do solo e sua relação com a temperatura do solo em diferentes posições na paisagem em área cultivada com cana-de açúcar. In: *Simpósio sobre Plantio direto e Meio ambiente; Seqüestro de carbono e qualidade da água*, pp. 210–212. Anais. Foz do Iguaçu, 18–20 de Maio 2005.
- Brown, G.G., Oliveira, L.J., Norton, D., Alberton, O., Brandão Jr., O., Saridakis, G.P. & Torres, E. 2003. Quantifying scarab beetle-grub holes and their volume as affected by different tillage and crop management systems. In: *Proc. 16th ISTRO Conference*, pp. 213–218. 13–18 July 2003, Brisbane, Australia.

- Brussaard, L. 1994. Interrelationships between biological activities, soil properties and soil management. In D.J. Greenland & I. Szabolcs, eds. *Soil resilience and sustainable land use*, pp. 309–329. Wallingford, UK, CAB International.
- Brussaard, L. & Juma, N.G. 1995. Organisms and humus in soils. In A. Piccolo, ed. *Humic substances in terrestrial ecosystems*, pp. 329–359. Amsterdam, The Netherlands, Elsevier.
- Calegari, A. 1998. *The effects of winter green manure and no-tillage on soil chemical properties and maize yield*.
- Calegari, A., Darolt, M.R. & Ferro, M. 1998. Towards sustainable agriculture with a no-tillage system. *Adv. Geo. Ecol.*, 31: 1205–1209.
- Carbon Dioxide Information Analysis Center. 2003. *National CO₂ emissions from fossil-fuel burning, cement manufacture, and gas flaring: 1751–2000*, by G. Marland, T.A. Boden & R.J. Andres, eds. (available at <http://cdiac.esd.ornl.gov>).
- Castro Filho, C., Muzilli, O. & Podanoschi, A.L. 1998. Estabilidade dos agregados e sua relação com o teor de carbono orgânico num Latossolo roxo distrófico, em função de sistemas de plantio, rotações de culturas e métodos de preparo das amostras. *Rev. Bras. Ciên. Solo*, 22: 527–538.
- CDR. 2000. *Servicios financieros rurales y economía campesina sostenible*. Un estudio de caso en el departamento de Lempira, Honduras. I. Informe principal. Centro de Estudios para el Desarrollo Rural, Universidad Libre de Amsterdam, The Netherlands. 80 pp.
- Chan, K.Y., Heenan, D.P., Oates, A. & Munro, K. 2003. Hydraulic properties of an Alfisol with pre-existing pan under conservation tillage – effect of earthworms. In: *Proc. 16th ISTRO Conference*, pp. 300–304. 13–18 July 2003, Brisbane, Australia.
- Choto, C. & Saín, G. 1993. *Análisis del mercado de rastrojo y sus implicaciones para la adopción de la labranza de conservación en El Salvador*. Síntesis de resultados experimentales del PRM 1992. Vol. 4. pp. 212–222.
- Choto, C., Saín, G. & Montenegro, T. 1995. *Productividad y rentabilidad del sistema de producción maíz-sorgo bajo labranza de conservación en El Salvador*.
- Coulombe, C.E., Dixon, J.B. & Wilding, L.P. 1996. Mineralogy and chemistry of Vertisols. In N. Ahmad & A. Mermut, eds. *Vertisols and technologies for their management*, pp. 115–200. Developments in Soil Science 24. Amsterdam, The Netherlands, Elsevier.
- Crovetto, C. 1997. La cero labranza y la nutrición del suelo. In: *Agricultura sustentable de alta producción, ya!* pp. 73–78. 5º Congreso Nacional de AAPRESID, Mar del Plata, Argentina.
- Curry, J.P. & Good, J.A. 1992. Soil faunal degradation and restoration. *Adv. Soil Sci.*, 17: 171–215.
- Dalal, R.C. & Mayer, R.J. 1986a. Long-term trends in fertility of soils under continuous cultivation and cereal cropping in Southern Queensland. I. Overall changes in soil properties and trends in winter cereal yields. *Aust. J. Soil Res.*, 24, 265–279.
- Dalal, R.C. & Mayer, R.J. 1986b. Long-term trends in fertility of soils under continuous cultivation and cereal cropping in Southern Queensland. II. Total organic carbon and its rate of loss from the soil profile. *Aust. J. Soil Res.*, 24, 281–292.
- Davidson, E.A. & Ackerman, I.L. 1993. Changes in soil carbon inventories following cultivation of previously untilled soil. *Biogeochemistry*, 20: 161–193.
- Debarba, L. & Amado, T.J.C. 1997. Desenvolvimento de sistemas de produção de milho no sul do Brasil com características de sustentabilidade. *Rev. Bras. Ciên. Solo*, 21: 473–480.
- Derpsch, R. 1993. Sistema de Plantio Direto em Resíduos de Adubos Verdes em Pequenas Propriedades no Paraguai - Desenvolvimento e Difusão. In: *I Encontro Latino Americano sobre Plantio Direto na Pequena Propriedade*, pp. 375–386. Ponta Grossa. Anais.
- Derpsch, R. 1997. Importância de la siembra directa para obtener la sustentabilidad de la producción agrícola. In: *Agricultura sustentable de alta producción, ya!* pp. 153–176. 5º Congreso Nacional de AAPRESID, Mar del Plata, Argentina.
- Douglas, M.G., Mughogho, S.K., Saka, A.R., Shaxson, T.F. & Evers, G. 1999. *Report on an investigation into the presence of a cultivation hoe pan under smallholder farming conditions in Malawi*. Investment Centre Division FAO/World Bank Cooperative Programme. Washington, DC, World Bank.

- Duxbury, J.M., Smith, M.S. & Doran, J.W. 1989. Soil organic matter as a source and sink of plant nutrients. In D.C. Coleman, J.M. Oades & G. Uehara, eds. *Dynamics of soil organic matter in tropical ecosystem*, pp. 33–67. USA, University of Hawaii Press.
- Elliot, L.F. & Lynch, J.M. 1984. The effect of available carbon and nitrogen in straw on soil and ash aggregation and acetic acid production. *Plant Soil*, 78: 335–343.
- Elliot, L.F. & Lynch, J.M. 1994. Biodiversity and soil resilience. In J. Greenland & I. Szabolcs, eds. *Soil resilience and sustainable land use*, pp. 353–364. Wallingford, UK, CAB International.
- FAO. 1974. *Tree planting practices in African savannas*. FAO Forestry Development Paper No. 19. Rome.
- FAO. 1979. *Watershed development with special reference to soil and water conservation*. FAO Soils Bulletin No. 44. Rome.
- FAO. 1984. *Tillage systems for soil and water conservation*. FAO Soils Bulletin No. 54. Rome.
- FAO. 1989. *Soil conservation for small farmers in the humid tropics*. FAO Soils Bulletin No. 60. Rome.
- FAO. 1993. *Soil tillage in Africa: needs and challenges*. FAO Soils Bulletin No. 69. Rome.
- FAO. 1994. *Land husbandry. Components and strategy*. FAO Soils Bulletin No. 70. Rome.
- FAO. 1995. *Tillage systems in the tropics. Management options and sustainability implications*. FAO Soils Bulletin No. 71. Rome.
- FAO. 2000. *Fertilizers and their use. A pocket guide for extension officers*. Fourth edition. FAO/IFA. 70 pp.
- FAO. 2001. *Conservation agriculture. Case studies in Latin America and Africa*. FAO Soils Bulletin No. 78. Rome. 69 pp.
- FAO. 2002. Farm management and economics. In: *Training modules on Conservation Agriculture*. FAO Land and Water Digital Media Series, Volume 22. Rome.
- Fawcett, R.S. 1997. Influences of the no-till system on drinkability of water; consequences on water treatment and availability of water. In: *11 seminário internacional do sistema plantio direto*, pp. 3–10. Passo Fundo. Anais.
- Ferreira, M.C., Andrade, D.S., Chueire, L.M.O., Takemura, M. & Hungria, M. 2000. Tillage method and crop rotation effects on the population sizes and diversity of bradyrhizobia nodulating soybean. *Soil Biol. Biochem.*, 32: 627–637.
- Gassen, D.N. & Gassen, F.R. 1996. *Plantio direto. O caminho do futuro*. Aldeia Sul, Passo Fundo. 207 pp.
- Glanz, J. 1995. *Saving our soil: solutions for sustaining earth's vital resource*. Boulder, USA, Johnson Printing.
- Greenland, D.J. 1958. Nitrate fluctuations in tropical soils. *J. Agric. Sci.*, 50: 82–92.
- Gregorich, E.G., Greer, K.J., Anderson, D.W. & Liang, D.C. 1998. Carbon distribution and losses: erosion and deposition effects. *Soil Till. Res.*, 47: 291–302.
- Guimarães, R.C., Buaski, E. & Masqueto, V.L.I. 2005. Bacia do Rio do Campo, Campo Mourão - PR. In: *Simpósio sobre Plantio direto e Meio ambiente; Sequestro de carbono e qualidade da água*, pp. 110–115. Anais. Foz do Iguaçu, 18–20 de Maio 2005.
- Gupta, V.V.S.R. & Germida, J.J. 1988. Distribution of microbial biomass and its activity in different soil aggregate size classes as affected by cultivation. *Soil Biol. Biochem.*, 20: 777–786.
- Haney, R.L., Senseman, S.A. & Hons, F.M. 2002. Effect of roundup ultra on microbial activity and biomass from selected soils. *J. Env. Qual.* Madison.
- Holland, E.A. & Coleman, D.C. 1987. Litter placement effects on microbial and organic matter dynamics in an agro-ecosystem. *Ecology*, 68: 425–433.
- Hudson, B.D. 1994. Soil organic matter and available water capacity. *J. Soil Wat. Con.*, 49(2): 189–194.
- Hungria, M., Andrade, D.S., Balota E.L. & Collozzi-Filho, A. 1997. Importância do sistema de semeadura directa na população microbiana do solo. Comunicado Técnico 56. Londrina, Brazil, EMBRAPA-CNPSo. 9 pp.

- Ingham, E.R. 2000. The soil food web. *In: Soil biology primer*. Rev. edition. Ankeny, USA, Soil and Water Conservation Society.
- Izaurrealde, R.C. & Cerri, C.C. 2002. Organic matter management. *In: Encyclopedia of soil science*, pp. 910–916. New York, USA, Marcel Dekker Inc.
- Jenkinson, D.S. & Ayanaba, A. 1977. Decomposition of C-14 labelled plant material under tropical conditions. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 41: 912–915.
- Jones, M.J., & Wild, A. 1975. *Soils of the West African savannah*. Technical Communication No. 55. Commonwealth Bureau of Soils. Farnham, UK, Commonwealth Agricultural Bureaux.
- Juma, N.G. 1998. *The pedosphere and its dynamics: a systems approach to soil science*. Volume 1. Edmonton, Canada, Quality Color Press Inc. 315 pp.
- Juo, A.S.R. & Lal, R. 1977. The effect of fallow and continuous cultivation on physical and chemical properties of an Alfisol in western Nigeria. *Plant & Soil*, 47: 507–584.
- Ladd, J.N. & Amato, M. 1985. Nitrogen cycling in legume cereal rotations. *In* B.T. Kang & J. Van der Heide, eds. *Nitrogen management in farming systems in humid and sub-humid tropics*, pp. 105–127. Haren, The Netherlands, Institute for Soil Fertility (IB), and Ibadan, Nigeria, International Institute for Tropical Agriculture.
- Lal, R. 1991. Soil conservation and biodiversity. *In* D.L. Hawksworth, ed. *The biodiversity of microorganisms and invertebrates: its role in sustainable agriculture*, pp. 89–103. Wallingford, UK, CAB International.
- Lal, R. 1994. Sustainable land use systems and soil resilience. *In* J. Greenland & I. Szabolcs, eds. *Soil resilience and sustainable land use*, pp. 41–67. Wallingford, UK, CAB International.
- Lal, R. 2005. No-till farming and environment quality. *In: Simpósio sobre Plantio direto e Meio ambiente; Sequêstros de carbono e qualidade da água*, pp. 29–37. Anais. Foz do Iguaçu, 18–20 de Maio 2005.
- Lavelle, P. & Pashanasi, B. 1989. Soil macrofauna and land management in Peruvian Amazonia (Yurimaguas, Loreto). *Pedobiologia*, 33: 283–291.
- Lavelle, P. & Spain, A. 2001. *Soil ecology*. Dordrecht, The Netherlands, Kluwer Academic Publishers.
- Lefroy, R.D.B., Blair, G.J. & Strong, W.M. 1993. Changes in soil organic matter with cropping as measured by organic matter fractions and ¹³C natural isotope abundance. *Plant Soil*, 155/156: 399–402.
- Linn, D.M. & Doran, J.W. 1984. Effect of water-filled pore space carbon dioxide and nitrous oxide production in tilled and nontilled soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 48: 1267–1272.
- Lovato, T. 2001. Dinâmica do carbono e nitrogênio do solo afetada por preparos do solo, sistemas de culturas e adubo nitrogenado. Porto Alegre UFRGS. 133 pp. (PhD thesis)
- Lovato, T., Mielniczuk, J., Bayer, C. & Vezzani, F. 2004. Adição de C e N e sua relação com os estoques no solo e com o rendimento do milho em sistemas de manejo. *Rev. Bras. Ci. Sol.*, 28: 175–187.
- Machado, J.A. 1976. Efeito dos sistemas de cultivo reduzido e convencional na alteração de algumas propriedades físicas e químicas do solo. Santa Maria. UFSM. (Tese de Doutorado)
- Matson, P.A., Parton, W.J., Power, A.G. & Swift, M.J. 1997. Agricultural intensification and ecosystem properties. *Science*, 277: 504–509.
- McGarry, D. 1996. The structure and grain size distribution of Vertisols. *In* N. Ahmad & A. Mermut, eds. *Vertisols and technologies for their management*, pp 231–259. Developments in Soil Science 24. Amsterdam, The Netherlands, Elsevier.
- Mielniczuk, J. 1996. A sustentabilidade agrícola e o plantio direto. *In* R. Trippia dos Guimarães Peixoto. D.C. Ahrens and M.J. Samaha, eds. *Plantio direto: o caminho para uma agricultura sustentável*. Palestras do I Congresso Brasileiro de Plantio Direto para uma Agricultura Sustentável. Ponta Grossa 1996. 275 pp.
- Mollison, B. & Slay, R.M. 1991. *Introduction of permaculture*. Harare, The Tutorial Press. 198 pp.
- Mrabet, R. 2000. Long-term no tillage influence on soil quality and wheat production in semiarid Morocco. Paper presented at the 15th ISTRO Conference, USA, 2–7 July 2000.

- Mrabet, R., Ibno-Namr, K., Bessam, F. & Saber, N. 2001a. Soil chemical quality and implications for fertilizer management after 11 years of no-tillage wheat production systems in semiarid Morocco. *Land Deg. Dev.*, 12: 525–517.
- Mrabet, R., Saber, N., El Brahli, A., Lahlou, S., & Bessam, F. 2001b. Total, particulate organic matter and structural stability of a Calcixeroll soil under different wheat rotation and tillage systems in semiarid areas of Morocco. *Soil Till. Res.*, 57: 225–235.
- Mueller-Harvey, I., Juo, A.S.R. & Wild, A. 1989. Mineralization of nutrients after forest clearance and their uptake during cropping. In J. Proctor, ed. *Mineral nutrients in tropical forest and savannah ecosystems*, pp. 315–324. Spec. Publ. No. 9. The British Ecological Society. UK, Blackwell Scientific Publications.
- Müller-Sämann, K. 1986. *Bodenfruchtbarkeit und standortgerechte Landwirtschaft. Eine Studie über Massnahmen und Methoden im Tropischen Pflanzenbau*. Schriftenreihe der GTZ No. 195. Eschborn, Germany.
- Nicoloso, R.S., Lovato, T. & Lanzanova, M.E. 2005. Potencial de seqüestro ou emissão de carbono em áreas de integração lavoura-pecuária no sistema plantio direto. In: *Simpósio sobre Plantio direto e Meio ambiente; Seqüestro de carbono e qualidade da água*, pp. 219–222. Anais. Foz do Iguaçu, 18–20 de Maio 2005.
- Palm, C.A. & Sanchez, P.A. 1990. Decomposition and nutrient release patterns of the leaves of three tropical legumes. *Biotropica*, 22: 330–338.
- Pangnakorn, U., George, D.L., Tullberg, J.N. & Gupta, M.L. 2003. Effect of tillage and traffic on earthworm populations in a Vertisol in South-East Queensland. In: *Proc. 16th ISTRO Conference*, pp. 881–885. 13–18 July 2003, Brisbane, Australia.
- Paustian, K. 2002. Organic matter and global cycle. In: *Encyclopedia of soil science*, pp. 895–898. New York, USA, Marcel Dekker Inc.
- Pieri, C., Evers, G., Landers, J., O’Connel, P. & Terry, E. 2002. *No till farming for sustainable rural development*. Agriculture and Rural Development Working Paper. Washington, DC, World Bank. 65 pp.
- Pietola, L., Horn, R. & Yli-Halla, M. 2003. Effects of cattle trampling on soil hydraulic and mechanical properties. In: *Proc. 16th ISTRO Conference*, pp. 923–928. 13–18 July 2003, Brisbane, Australia.
- Prasad, R. & Power, J.F. 1997. *Soil fertility management for sustainable agriculture*. New York, USA, Lewis Publishers. 356 pp.
- Primavesi, A. 1984. *Manejo ecológico del suelo. La agricultura en regiones tropicales*. 5ª Fdición. El Ateneo. Rio de Janeiro, Brazil. 499 pp.
- Prior, S.A., Runion, G.B., Torbert, H.A., Rogers, H.H. & Reeves, D.W. 2003. Effects of elevated atmospheric CO₂ on biomass production and carbon sequestration: conventional and conservation cropping systems. In: *Proc. 16th ISTRO Conference*, pp. 943–948. 13–18 July 2003, Brisbane, Australia.
- Proffitt, A.P.B., Bendotti, S. & McGarry, D. 1995. A comparison between continuous and controlled grazing on a red duplex soil. I. Effects on soil physical characteristics. *Soil Till. Res.*, 35:199–210.
- Quideau, S.A. 2002. Organic matter accumulation. In: *Encyclopedia of soil science*, pp. 891–894. New York, USA, Marcel Dekker Inc.
- Reicosky, D.C. 2005. Alternatives to mitigate the greenhouse effect: emission control by carbon sequestration. In: *Simpósio sobre Plantio direto e Meio ambiente; Seqüestro de carbono e qualidade da água*, pp. 20–28.. Anais. Foz do Iguaçu, 18–20 de Maio 2005.
- Rice, C.W. 2002. Organic matter and nutrient dynamics. In: *Encyclopedia of soil science*, pp. 925–928. New York, USA, Marcel Dekker Inc.
- Roth, C.H. 1985. Infiltrabilität von Latosolo-Roxo-Böden in Nordparaná, Brasilien, in Feldversuchen zur Erosionskontrolle mit verschiedenen Bodenbearbeitungs-systemen und Rotationen. *Gött. Bod. Ber.*, 83: 1–104.
- Ruedell, J. 1994. Pesquisa em plantio direto na palha e sua importância. In: *IV Encontro nacional de plantio direto na palha*, pp. 90–105. Cruz Alta.

- Ruedell, J. 1995. *Plantio direto na região de Cruz Alta*. FUNDACEP. 134 pp.
- Rummery, G. & Coleman, B. 1999. Does conservation farming pay? *Cons. Farm. News.*, April 1999 (available at <http://www.cfi.org.au>).
- Sampson, R.N. & Scholes, R.J. 2000. Additional human-induced activities. In R.T. Watson, I.R. Noble, B. Bolin, N.H. Ravindranath, D.J. Verardo & D.J. Dokken, eds. *Land use, land use change and forestry. A special report of the IPCC*, pp. 180–281. UK, Cambridge University Press.
- Schnitzer, M. 1986. The synthesis, chemical structure, reactions and functions of humic substances. In R.G. Burns, G. dell'Agnola, S. Miele, S. Nardi, G. Savoini, M. Schnitzer, P. Sequi, D. Vaughan & S.A. Visser, eds. *Humic substances: effect on soil and plants*. Congress on Humic Substances. March 1986, Milan, Italy.
- Schuette, J. 1998. *Environmental fate of glyphosate*. Environmental monitoring and pest management. Sacramento, USA, Department of Pesticide Regulation. (available at <http://www.cdpr.ca.gov/docs/empmp/pubs/fatememo/glyphos.pdf>)
- Siqueira, R., Yamaoka, R.S., Casão jr., R., Batista de Medeiros, G., Hamakawa, P.J. & De Souza Ladeira, A. 1993. Sistemas de preparo e coberturas vegetais em um solo de baixa aptidão agrícola. In: *I Encontro Latino Americano de Plantio Direto na Pequena Propriedade*, pp. 221–237. Ponta Grossa, Anais.
- Spagnollo, E. 2004. *Dinâmica da matéria orgânica em agroecossistemas submetidos a queima e manejo dos resíduos culturais*. UFSM, Santa Maria, RS, Brazil. 112 pp. (PhD thesis)
- Stevenson, F.J. 1994. *Humus chemistry. genesis, composition, reactions*. 2nd edition. New York, USA, Wiley Interscience. 512 pp.
- Swift, M.J., Heal, O.W. & Anderson, J.M. 1979. *Decomposition in terrestrial ecosystems*. Oxford, UK, Blackwell Scientific Publications.
- Swift, M.J., Vandermeer, J., Ramakrishnan, P.S., Anderson, J.M., Ong, C.K. & Hawkins B.A. 1996. Biodiversity and agroecosystem function. In H.A. Mooney, J.I. Cushman, E. Medina, O.E. Sala & E.-D. Schulze, eds. *Functional roles of biodiversity: a global perspective*, pp. 261–298. New York, USA, John Wiley and Sons.
- Tan, K.H. 1994. *Environmental soil science*. New York, USA, Marcel Dekker Inc. 304 pp.
- Tan, K.H. & Binger, A. 1986. Effect of humic acid on aluminium toxicity in corn plants. *Soil Sci.*, 14: 20–25.
- Tate, R.L. 1987. *Soil organic matter: biological and ecological effects*. New York, USA, John Wiley & Sons. 291 pp.
- Theng, B.K.G. 1987. Clay-humic interactions and soil aggregate stability. In P. Rengasamy, ed. *Soil structure and aggregate stability*, pp. 32–73. Proc. Institute of Irrigation and Salinity Research. Tatura, Australia.
- Torstenson, L. 1985. Behaviour of glyphosate in soil and its degradation. In E. Grossboard & D. Atkinson, eds. *The herbicide glyphosate*, pp. 137–149. Butterworth & Co. Ltd.
- Uehara, G. & Gilman, G. 1981. *The mineralogy, chemistry and physics of tropical soils with variable charge clays*. Boulder, USA, Westview Press. 170 pp.
- Unger, P.W. 1978. Straw-mulch rate effect on soil water storage and sorghum yield. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 42: 486–491.
- Van der Werff, P.A. 1990. Soil and litter fauna. In B.H. Janssen & J.F. Wienk, eds. *Mechanized annual cropping on low fertility acid soils in the humid tropics. A case study of the Zanderij soil in Suriname*. Wageningen Agricultural University Papers 90–5.
- Van Keer, K., Comtois, J.D., Ongprasert, S. & Turkelboom, F., eds. 1996. *Options for soil- and farmer-friendly agriculture in the highlands of northern Thailand*. Soil Fertility Conservation Project. Mae Jo University, Thailand, and Catholic University of Leuven, Belgium.
- Vermeer, A.W.P. 1996. *Interactions between humic acid and hematite and their effects on metal ion speciation*. Wageningen University, The Netherlands. (PhD thesis)
- Vieira, M. & Van Wambeke, J. 2002. Conservation agriculture and rural development. Experiences in El Salvador. *LEISA Mag.*, 18 (3): 11–12.

- Voss, M & Sidirias, N. 1985. Nodulação da soja em plantio direto em comparação com plantio convencional. *Pesq. Agropec. Bras.*, 20: 775–782.
- Whitbread, A.M., Lefroy, R.D.B. & Blair, G.J. 1998. A survey of the impact of cropping on soil physical and chemical properties in north-western New South Wales. *Aust. J. Soil Res.*, 36: 669–681.
- World Neighbors. 2000. *Lessons from the field. Reasons for resiliency: toward a sustainable recovery after hurricane Mitch*. Honduras. 32 pp.

付録1. 土壤生物

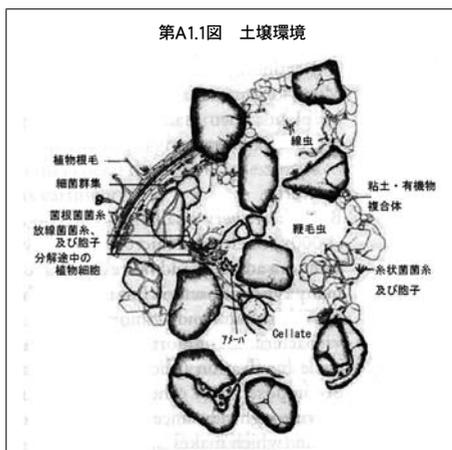
土壤生物は、その系により様々な程度に、土壤の欠くべからざる機能を働かせる要因となっている（第A1.1図）。この土壤の生物多様性は重要であるがあまり理解されていない陸上生態系の一部である。土壤生物が多様であることは、土壤中または落葉落枝層および腐朽木中を含む直接的地表範囲で、生活環の全部あるいは一時期を過ごす生物で構成されていることから想像できよう（第A1.1表）。

土壤生物は世界的な陸上生物多様性の大きな部分を占めている。それらは、自然生態系および農業生態系両方の

土壤において、土壤の健全性および肥沃度に重要な一連の過程を担当している。この付録は土壤に普通に見出される生物とそれらの主な生物学的、生態学的属性についての簡単な説明を提供する。

土壤中で生活の全部あるいは一部の生活をする生物の共同体は、土壤食物の連鎖網（soil food web）を構成している。土壤生物の活性は、あるものは生きている植物および動物によって暮らし（食植者（herbivores）および捕食者（predators））、他のものは死んだ植物遺体を利用して生き（腐食者（detritivores））、あるものは糸状菌や細菌を餌とし、他のあるものは宿主に寄生してはいるが寄主の消費はしないで生活する（寄生者（parasites））といった食物連鎖網の中で、相互に作用している。植物とコケおよびある種の藻類は独立栄養性（autotrophs）であり、太陽エネルギー、水、および大気からの二酸化炭素（CO₂）を使って有機化合物と生きた組織を作り上げる第一次生産者（primary producer）の役目を演じている。他の独立栄養生物は、窒素（N）、イオウ（S）、鉄（Fe）および炭酸塩鉱物のC等の酸化を通して、土壤無機物の分解によってエネルギーを獲得している。土壤動物相（soil fauna）と殆どの糸状菌、細菌および放線菌は従属栄養性生物（heterotrophs）であって、直接（第一次消費者（primary consumers））または間接的に仲介者を介して（第二次または第三次消費者（secondary or tertiary consumers））有機物を摂ってCおよびエネルギーの需要を充たす。

食物連鎖網の図は、あるものが他の者を食べる際の一連のエネルギーおよび栄養の



Source: S. Rose and E.T. Elliott

転換（矢で表される）を表す。食物連鎖網の“構造（structure）”は土壤内に棲息する各群の生物の組成と相対的な数である。土壤の生きている成分というべき食物連鎖網は複雑であり異なる生態系では異なった構成をもっている。健全な土壤では、多数の細菌と細菌食性（bacterial feeding）生物がいる。

第A1.1表 土壤生物の範疇と特徴

範疇	特徴	生物
系統的	土壤中での全生産	ダニ類、トビムシ類、ミミズ類
一時的	土壤中での生産の一部	昆虫の幼虫
周期的	土壤中に捕食侵入	ある種の昆虫の幼虫
遷移的	土壤中での不活性相（卵、蛹、冬眠等）しかし土壤外で活性期間	ある種の昆虫
偶然的	落下または引き込まれた生物	昆虫の幼虫

土壤がそれらの生物を殺すような殺虫剤、化学肥料、殺菌剤、あるいは燻蒸剤を受けたところでは有益な土壤生物は死滅しあるいは活動が阻害され、あるいは病原菌と有益生物の釣り合いが崩れて、日和見生物（opportunists）（病気を起こすかもしれない生物）に実際に問題をおこさせる可能性がある。

土壤生物を分類する簡単で最も良く使われる体系は体の大きさを使って、三つの主な群に分ける方法である：すなわち大型生物相（macrobiota）、中型生物相（mesobiota）、微生物相（microbiota）である（Wallwork, 1970; Swift, HealとAnderson, 1979）。各寸法群を決定する範囲は各群の全ての成員に対して厳密ではない。

微生物群（micro-organisms）

これらは最小（直径<0.1mm）で極度に多数かつ多様である。それは藻類（algae）、細菌（bacteria）、藍藻類（cyanobacteria）、糸状菌（fungi）、酵母（yeast）、粘菌（myxomycetes）、および放線菌（actinomycetes）を含み、自然に存在する殆どあらゆる物質を分解することができる。微生物は有機物を植物により同化できる植物栄養素に転換する。二つの主な群が通常農業土壤に見出される：細菌と菌根菌（mycorrhizal fungi）である。

細菌

細菌は非常に小さい単細胞生物であり、強力な（1,000倍）光学あるいは電子顕微鏡によってのみ観察できる。そのバイオマスは土壤生物のうち最大量を構成する。細菌は、食物源のひとつである根の表面近傍に数多く生息する。様々な型の細菌があるが、ここでは農業にとって最も重要なものの例として、根粒菌（rhizobium）と放線菌に焦点を置く。

細菌は、固定による炭素循環（光合成）および分解に貢献しているため、農業土壤で重要である。ある細菌は重要な分解者（decomposer）であり、放線菌のようなものはセルロース（植物の細胞壁を構成する）およびキチン（糸状菌の細胞壁を構成する）のように頑丈な物質を分解する上で殊に効果的である。

土地利用は、栄養水準に影響し、従って分解者の優占を細菌から糸状菌に遷移させる可能性があるため、細菌集団の構造に影響する。

細菌のひとつの群は殊に窒素循環に重要である。自由生活 (free-living) 細菌が大気窒素を固定し、それを土壤の窒素溜めに加える；これは生物学的窒素固定と呼ばれ、農業では非常に有益な自然過程である。もうひとつのN固定細菌はマメ科植物の根と (根粒の形で) 共生している (ボックスA1.1)。

根粒 (nodule) は、大気Nが細菌によって固定され、植物にとって速やかに同化できるアンモニウムに変換される場所である。その過程はかなり込み入っているが一般にこの細菌は根の近傍で増殖しそれに付着する。次いで根表面の細い毛が細菌の周りをとり囲みそれが根に入ってゆく。あるいは、細菌が根表面のある点を通して直接入ってゆくこともある。一旦根に入ると細菌は細い糸の内部で増殖する。何らかの信号が植物細胞と細菌の両方の細胞増殖を刺激する。この繰り返しである分裂が多くの細菌細胞を含む根細胞の塊を生み出す。これらの細菌のあるものは気体Nをアンモニウム窒素に変換できる形態へと変化する (それらはNを“固定 (fix)”できる)。これらの細菌はバクテロイド (bacteroid) と呼ばれ、自由細胞とは異なった性質を現す。大抵の植物は根粒を形成するのに特異的な種類の根粒菌を必要とする。ある特異的な根粒菌種が特定植物に根粒を形成し、ほかの種類の植物には形成しないのである。根粒が造る形は植物によって調節され根粒の大きさおよび形は著しく変動する。

放線菌は土壤中で糸状の繊維を形成する広い範囲の細菌群である。新たに曝露された湿った土壌の特徴的な匂いはこれらの生物によるものであり、殊にそれらが代謝過程の産物として放出する養分によるものである。放線菌はある非マメ科植物と共生してNを固定し、それもまた宿主と近傍の他の植物にとって有効である。

細菌は、多糖類 (一種の糖) の形で粘性の物質を生産 (分泌) し、それが土壤粒子を小さな団粒に結合し、土壤に構造的安定性を与える。このようにして、細菌は、土壤団粒安定性を改善し、水浸透および容水量を改善するので重要である。しかしながら、一般にそれらの影響は、ミミズのような大きな無脊椎動物によるものよりは顕著ではない。

ボックスA1.1 根粒菌と根粒着生過程 (nodulation process)

根粒着生は根粒菌がマメ科植物の根と相互作用をして根粒と呼ばれる特殊化した構造を形成する一連の過程である。



マメ科植物の根のいろいろな型の根粒：

- (1)ダイズ；(2)アルファルファ；(3)エンドウ
- (4)シロクロウバ(Sitner, 1978)

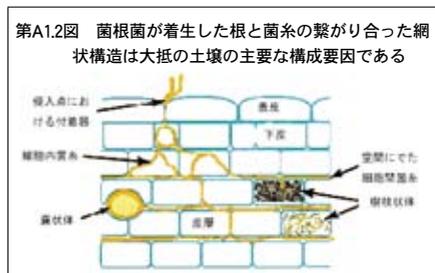
Source : FAO(2000)

糸状菌類

これらの生物は植物の細胞壁成分であるセルロースを分解・同化し得るので陸上生態系において分解という重要な課程を担っている。糸状菌は、直径僅か数マイクロメートルであるが、長さ数細胞ないし数メートルにも及んで伸びる能力を持つ菌糸と呼ばれる長い糸または繊維として生長することのできる顕微鏡的細胞から構成されている。土壌糸状菌は、自らのエネルギーを獲得する手段によって三つの一般的な機能群に分けられる：

➤分解者 (decomposer) – 腐生糸状菌 (saprophytic fungi) – は死んだ有機物を糸状菌バイオマス、CO₂および有機酸のような小さな分子などに転換する。これらの糸状菌は一般に木材中のセルロースやリグニンのような複雑な基質を利用する。彼等は汚染物質中にある炭素環構造を分解するのに欠かせない。細菌と同じく糸状菌は土壌中で栄養素を同化・保持するために重要である。

➤共生者 (mutualist) – 菌根糸状菌 (mycorrhizal fungi) – は共生関係を通じて植物根に住み着く。共生 (symbiosis) の定義は互いに利益を与え合う二あるいはそれ以上の異なる種の生物間の緊密かつ永続的な関連である。菌根菌は植物根と協同して表面積を増加するが、それによって植物に協同がなかったら有効ではない栄養や水に到達することを可能にする。菌根菌は本質的に栄養および水への植物の到達範囲を広げ植物に土壌中の有効な資源をより多く利用させるのである。菌根菌は住み着いている植物根から炭水化物 (エネルギー) を受け取り、自らは通常土壌からリン (P) を根に運搬して植物を助ける。二つの主要な群が確認されている：(i)外生菌根菌 (ectomycorrhizae)、これらは根の表層に生息し、通常樹木根と共生している。(ii)内生菌根菌 (endomycorrhizae)、樹枝状体菌根菌 (arbuscular mycorrhizal fungi) と嚢状体菌根菌 (vesicular mycorrhizae fungi) のように根細胞内で生育し、通常、草、条植作物 (row crops)、野菜および灌木と共生している。樹枝状体菌根菌は、その菌糸が網目を形成して土壌団粒を安定化を助けるため、土壌の物理的特性に利益を与えることもできる。嚢状体-樹枝状体菌根菌は最もひろく広がっている菌根菌である。菌根菌は、Pが植物根に向かって容易には動かないため、特にリン酸吸収に重要である。これらの生物は植物に害を与えることなく植物は糖の形で糸状菌にエネルギーを提供する。糸状菌は事実上植物根細胞の内部および周辺に生育する繊維の網目構造により、植物根系を越えて顕著に広がる連絡網を形成する (第A1.2図)。



Source: drawing by M. Brundrett, CSIRO.

➤病原者または寄生者 (pathogen or parasite) は、それらが根あるいは他の生物に住み着くと、生産を減ずるか死滅させることがある。パーティシリウム、ピシウムおよびリゾクトニアといった根病原性糸状菌は農業において毎年主要な損失を及している。多くの糸状菌が病気を制御するのを助けている、例えば線虫罠糸状菌 (nematode-trapping fungi) は病原性線虫を餌としているし、昆虫食性糸状菌は生物制御剤 (biocontrol agent) として使える可能性がある。

微小動物相 (microtauna)

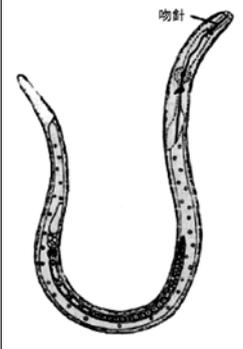
微小動物相 (直径<0.1mm) は土壌水膜中に住み、微小植物相、植物根、他の微小動物相およびときにはより大きな生物 (例、昆虫病原性線虫 (entomopathogenic nematodes) は昆虫および他のより大きい無脊椎動物を餌とする) を食べて生活するとりわけ小さいトビムシ類 (collembola) およびダニ類 (mites)、線虫類 (nematodes) および原生動物 (protozoa) を含む。彼等は土壌微小生物に同化された栄養を解放する上で重要である。

線虫類 (nematodes)

線虫は土壌中どこにでも住んでいる小さな糸状のカイチユウ (round worm) である。

これらは土壌水膜中に自由生活をしているもの；農業に有益であったりあるいは植物寄生性であったりし (第A1.3図)、あるいは生きている根の表面または内部に住むもの (寄生性) などがある。自由生活線虫は細菌または糸状菌を食しそれ故有害な微生物数を制御する。これら線虫は長さ0.15-5mm、幅2-100 μ mである；1例外は *Mermithidae* 線虫でこれは長さ20cmに及び熱帯土壌には極く普通に生息し、イナゴ等節足動物の寄生者である。線虫は土壌粒子の周りの水分膜を通して土壌中を動きまわる。彼らは土壌粒子の空間を充たし根を蔽う水中で生活する (線虫は水中生活者なのである)。暑く乾いた条件下では、彼らは休眠状態に入り、水が利用できるようになるや否や、活性を取り戻すのである。線虫類は土壌中では主要な消費者群と認められ、一般に餌の性質、口と食道の構造、および摂食の仕方に基づいて四ないし五の栄養範疇に区分されている (YeatesとColeman, 1982)；細菌食者 (bacterial feeder)、糸状菌食者 (fungal feeder)、捕食者 (predatory feeder)、雑食者 (omnivore) および植食者 (plant feeder)。細菌食者は細菌を捕食し (細菌食性) 5000細胞/分すなわち毎日自身の体重の6.5倍ほども消化している可能性がある。このことは土壌中

第A1.3図 植物根に侵入するために用いる吻針を示している植物寄生性線虫の図



で有機物および分解者の両方を分散させるのを助けている。細菌食者と糸状菌食者はそれぞれの餌群を摂食するときNの大きな割合を放出し、多数の土壌の中で植物に有効なNを生み出している(Inghamら、1985)。毎年の全消費量はヘクタール当り細菌800kgほど、N回転量は20~130kgの範囲と見積もられている(Colemanら、1984)。

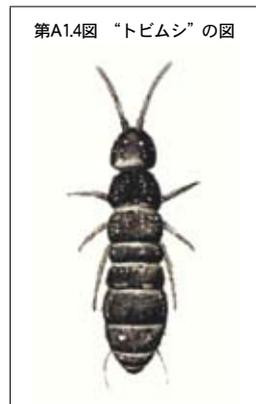
植食者 (phytophages) すなわち植物食性線虫は植物根に損害を与え、農民に重要な経済的結果をもたらす。彼らは大きさや構造が広く異なった吻針 (stylet) を持ち、その植物病害をもたらし、作物収量を減少させるため、最も広く研究された土壌線虫群である。

中型動物相 (mesotauna)

中型動物相 (直径0.1~2mm) は主としてカニムシ類、トビムシ類、ダニ類のような微小節足動物および回虫状のヒメミミズ類を含む。中型動物相は限定的穿孔能力を持ち、一般に土壌孔に住み、有機物、微小植物、微小動物およびその他の無脊椎動物を餌としている。

トビムシ類 (collembola)

コレンボラスなわちトビムシ類は落葉枝または土壌の上層10~15cmの孔隙空間に棲む微小節足動物である。彼らは腐生性 (saprophagous) であり主に糸状菌、細菌および分解しつつある植物落葉落枝上で生育する藻類を餌としている(Ponge, 1991)。トビムシは亜地表性分解者として重要である。大抵の昆虫とは異なり、彼らは如何なる段階においても翅を持たない。彼らは体長数ミリメートル (第A1.4図)で、特徴的な付属器官である分岐した“尾”を伸ばし、それによって危険な時は跳ぶことができる。トビムシは恐らく地球上の昆虫の中で最も多い群である。



Source: J.W. Folsom.

カニムシ類 (pseudoscorpions)

カニムシ類は8mmを超えることが稀な小さな節足動物である。彼等は落葉落枝、衰弱しつつある植生および土壌中で生活している。カニムシ類は、脚鬚上に比較的大きな鋏を持ち表面的には本当のサソリに似ているが、尾節あるいは毒牙を持たない。カニムシ類は非常に小さいトビムシやダニのような節足動物を餌としている。

大型動物相 (macrofauna)

大型動物相に分類される構成種は裸眼で見える (通常>直径2mm)。大型動物相

が含むのは、主に餌や避難のため土壌を掘る脊椎動物（蛇、蜥蜴、ハツカネズミ、ウサギ、モグラ等）、土壌、表面落葉落枝層およびそれらの成分の中または上で生活するか餌を摂る無脊椎動物（カタツムリ、ミミズ、アリ、シロアリ、ヤスデ、ムカデ、青虫、甲虫の幼虫および成虫、ハエやハチの幼虫、クモ、サソリ、コオロギおよびゴキブリ）等である。自然および農業生態系両方の中で、土壌大型動物相は分解、栄養循環、土壌有機物動態および索餌や削孔活動の結果として水運動の通路形成などで重要な制御者（regulators）である。ここでは土壌無脊椎動物（invertebrate）に焦点を当てる。

ミミズ類（earthworms）

土壌中におけるミミズの効果は関係する種の生態学的な範疇によって異なる（Bouché, 1977; Lavelle, 1981）：

- ▶ 亜地表性（epigeic）：彼等は、落葉枝層内、早魃、高温あるいは捕食者の存在などに曝され易く非常に変化に富む環境内で生活している。これらのミミズは一般に小さく着色（緑または帯赤色）しており速やかに運動する。
- ▶ 地中性（endogeic）：これらは着色せず（無色）土壌中に棲み餌を摂る。この群は更に三つの亜群に分かれる；消化する土壌の有機物含量によって、貧腐植性（oligohumic）、中腐植性（mesohumic）および多腐植性（polyhumic）。
- ▶ 汎居性（anecic）：これらのミミズは表面落葉枝を餌としそれらを土壌と混合するが、時間の殆どを地中で過ごす。彼らは大きく、暗い前背面の着色があり、垂直に近い穴を掘る。

広範な適応の結果、ミミズ類は土壌中で多様な機能を持っている。亜地表性ミミズはコンポスト製造者として利用されるが土壌構造には影響を与えない。汎居性および地中性ミミズは混合および削孔活動により土壌構造および土壌有機物に影響を与える。

ミミズ類は一般に植物成育に有益な効果をもたらす。しかし、特別な状況のもとでは負の効果が誘導されることがある。穀物収量への影響はミミズバイオマスと比例する；顕著な影響はバイオマス値>30g新鮮重で現れ始める（Brownら、1999）が、単一のミミズ種（例、*Pontoscolex corethrurus*）が非常に高くなると特殊な状況下では生産を阻害する可能性がある。作物生育の刺激には多くの機構が含まれている。それらは土壌構造および栄養の有効性に対する大規模効果から、菌根菌感染の増加あるいは植物一寄生性線虫の制御へと多様に互っている。一旦ミミズが棲みつくと、長周期作物（long cycle crops）を含む作物輪作または良い有機物添加を伴った永年性作物を含む輪作など動的な栽培体系が、ミミズの活動から得られる永く続く利益を確かにする。

シロアリ類 (termites)

シロアリ類は世界の色々な地域で土壌大型動物相の重要な成員である。彼らは社会性昆虫で、形態学的並びに生理学的な特殊化の組み合わせを持つ多数のカースト（異なる個体）から成る組織化された群体で生活している。主たるカーストは；女王（群体を創設したシロアリ）、働きアリおよび兵隊アリである。

個体アリも群体も通常は長距離を出歩くことは無く、自らの縄張り領域内かあるいは食物内に限定されて生活している。多くの種は生きた植物を餌としており、ある種は死んだ残渣が少ないところでは農業体系において深刻な害虫になることがある。（Wood, 1996）。大抵の種は土壌表面上または地中の死んだ植物物質を餌としている。彼らの食物源は腐りつつある植物物質、死んだ飼料、木質物、種子および高等動物の糞などを含む（Lavelle と Spain, 2001）。更に土壌木質食者（soil-wood feeder）および土壌食者（soil feeder）が居るが、そのことは高い割合で無機物質を摂取することを意味する。彼らの栄養は主として良く分解した木質物および部分的に腐植化した土壌有機物である。シロアリの一群は巣の中で糸状菌を育てている（カビ栽培シロアリ（fungus-growing termite））。

シロアリは摂食環境（feeding habitat）によって分類することができる：

- 草本収穫者（grass harvester）
- 表面落葉落枝食者（surface litter feeder）
- 木食者（wood feeder）
- 土壌木食者（soil-wood feeder）
- 土壌食者（腐植食者）（soil feeder, humivore）。

シロアリが形成した巣は色々な場所で見られる。例えば、生きたあるいは死んだ樹木の内部、地下部、他の種のシロアリが造った巣の中、および地上部巣（土壌表面上）や樹上部巣など。

アリ (ants)

アリは土壌中に多様な構造を造る。しかし、採食習性のため、土壌中の制御過程としては彼らはシロアリやミミズほど重要ではない。

甲虫類 (beetles)

甲虫（鞘翅目）は分類学的には多様であって、大きさおよび土壌あるいは落葉落枝中で彼等が演じている生態学的役割は非常に異なっている。かれらは腐食性、植食性または捕食性であったりする。二群が農業土壌と特に関係がある：一例は *Scarabaeidae* 科（フンコロガシ類）の幼虫であり、牛放牧用の自然サバンナおよび草地において牛糞を埋め込むのに必須である（例、アフリカにおいて）；他の場合はコフキコガネ幼虫であり、それらの幼虫は草地に多く生きた根を餌とするので作物生産

に影響を及ぼすことがある (VillalobosとLavelle, 1990)。

フンコロガシは、いろいろな数の小部屋を伴う幅10~15mm長さ50~70cmのほぼ垂直な回廊を掘るが、それらは更に糞の大きな粒で充たされる。親虫は各小部屋のなかに一つずつ産卵し、幼虫はその小粒を餌として育ち循環を完成させる (LavelleとSpain, 2001)。彼らは土壌表面に高さ数センチメートルの小山を生じる (Hurpin, 1962)。

生物起源の構造 (biogenic structures)

生物起源の構造というのは生きた生物により生物学的に造りだされた構造をいう。生物起源構造の三つの主要な範疇が農業系に普通に見出される：ミミズの糞と穴、シロアリの小山およびアリ塚である。生物起源構造は、土壌表面あるいは土壌内部に残され、一般に周辺の土壌とは異なる物理的または化学的性質を持つ。大きな土壌生物により造られた構造の色、大きさ、形および一般的様相は、それを造った種ごとに記載され得る。生物起源構造の形は、土壌表面の各種の構造を通して動かされた土壌の体積の計算を速めるときには単純な幾何学的形態になぞらえられる (球、円柱など)。



写真A1.1
あるアフリカの土壌表面の粒状排泄物。

ミミズ糞 (earth worm casts)

ミミズ糞は、それを造るミミズの大きさによって大きさが異なる。それらは、直径数ミリメートルから数センチメートル、重さはほんの2~3グラムから400g以上に亙る。

粒状の糞 (写真A1.1) は非常に小さく、孤立した糞小粒として造られる (Lee, 1985)。

それらは土壌表面上または土壌中に見出され、一般に垂地表性ミミズによって造られる。

小球状糞はより大きく大きな集合体として造られる (Lee, 1985)。これらは通常地中性あるいは汎居性ミミズにより造られる。汎居性ミミズにより造られた糞はいくらか孤立した丸または楕円形の粒の集合体 (直径1ないし数ミリメートル) を成し、(さらに) “糊状の泥質物” (paste-like slurries) によ



写真A1.2
あるアフリカのミミズが造った小球状糞。

り融合して大きな構造体を形成する。それ故、糞は大きな形の塔状になり、古い（即ち、乾燥し堅い）ものは基部に、若い（即ち、新鮮で柔らかい）ものは頂上へと時期の異なる重なりあった層を成す（写真A1.2）。汎居性ミミズにより造られた糞は周囲の土壌より有機物特に大粒の植物材料の含量が高く、小さな鉱物成分の含量が高い。

ミミズ穴（earth worm burrows）

ミミズは土壌中を動いて穴または回廊 (burrows or galleries) を建設する（写真A1.3）。回廊の型と大きさはそれを造るミミズの生態学的な範疇に依存する。

汎居性ミミズは半永久的なほぼ垂直の回廊を、地中性のミミズは水平に近い穴を造る。これらの回廊は糞によって充填されることもあり、さらにその糞が他のより小さいミミズまたは土壌生物によってより小さな集合体に分割されることもある。

土壌微生物（細菌）は回廊壁表面と周囲土壌の近傍 2 mm に著しく濃縮している。この微環境は全土壌容積の 3 パーセント以下にしかならないが、全土壌の微植物相の 5~25 パーセントを含み、細菌のいくつかの機能群が優占しているところでもある（Lavelle と Spain, 2001）。



写真A1.3

コロンビアのサバンナにおけるミミズ (*Martiodrilus* sp.) 回廊、糞で充たされ根がミミズが開けた通路に沿っている。根毛は周囲の土壌に比べ栄養(N,P,K)の有効性が高い糞に付着している。

シロアリ塚 (termite mounds)

シロアリ塚はサバンナ景観の中では最も目立つ構造である。シロアリ塚は多様な型があり地下起源から始まるシロアリの巣の地上部分である。アフリカではシロアリは平原のバイオマスの半ばを占めている。

シロアリは多量の材料を自らの建築活動で加工し、それ故周囲の土壌に比べると土壌の諸性質に影響を与えている (Lee と Wood, 1971)。土壌の粒径組成と構造はシロアリ塚中では強く修正されている。一般にシロアリ塚の土壌はシロアリが土壌深層から上位層に運搬した細粒 (粘土) の割合が高い。



写真A1.4

コロンビア平原における糸状菌栽培アリによる土山。

アリの土山 (ant heaps)

熱帯アメリカの属、*Acromyrmex*と*Atta*は葉切りアリであり（写真A1.4）、地下に巣をつくるが葉の収穫では多量の有機物とそれに伴う栄養の土壌への取り込みが起こる。

根

根は通常土壌生物とは考えられてはいないが、殆どが土壌中で生育し、地上および地下の植物と動物数に広範かつ永続的な影響を及ぼす。それ故それらは土壌生物相に含まれる。

根圏 (rhizosphere)

根圏は植物根に直接的に隣接し、その影響を受ける土壌域である。そこは植物、土壌、微生物、栄養および水が出会い働き合う非常に動的な環境である。根圏は植物の根の活性およびその土壌生物に対する影響の故に大部分の土壌とは異なっている。

根の分泌物は栄養の有効性を高めることができ、微生物の餌源を供給する。これによって、微生物数は根圏では大部分の土壌におけるよりも多くなる。それらの存在は微生物を餌とするより大きな土壌生物を引き付け根圏における生物密度は大部分の土壌の500倍以上にも達することがある。

根圏の重要な様相は植物による水および栄養の吸収である。植物は水と栄養を自分の根に取り込む。これは周囲の土壌から根および根圏のほうへと水を吸引する。

根圏近くの土壌生物は植物根へ影響を与える、というのは：

- ▶彼らは根から地上部へのC化合物の動きを変える（移動）。
- ▶ミミズの回廊（穴）は根が土壌中で生育する際辿る容易な通路を提供する（写真A1.3）。
- ▶菌根菌着生は植物による栄養吸収を増加させる。
- ▶それらのあるものは病原性であり植物根を攻撃する。

農業土壌における有益生物対有害生物

農業上の諸活動は土壌生物に正または負の影響をもたらす。土地管理および農業作業はあらゆる水準で土壌生物集団の組成を変え、土壌肥沃度および植物生産性に関連して重要な結果をもたらす。土壌生物の若干の群、特に微生物、植物寄生性/病原性または根ファージ、植物根、大型動物相の植物生産、の正および負の影響などの諸事例がある。

農民達が使った農法の差もまた重要な影響を土壌生物相、それらの活性および多様性に及ぼす。森林あるいは草地の農耕のための刈り払い土壌環境従って土壌生物の数と種類に劇的な影響をもたらす。一般にそれらの活動は植物残渣の質および植物種

の数を著しく低下する。従って土壤生物の棲家の範囲と餌は顕著に減少する。

物理的および化学的環境の変化を通して、例えば石灰、肥料や堆肥の添加、あるいは耕作行為や殺虫剤を通して、農業行為は諸生物の比率および彼らの相互作用を甚しく変換する。

影響を受ける可能性がある土壤生物の農業生産性に及ぼす正の効果は以下を含む：

- 有機物分解および土壤団粒形成；
- 生物の代謝副産物および農薬を含む有毒化合物の分解；
- 有効硝酸塩、硫酸塩およびリン酸塩、またFeやMnのような必須元素を生ずる無機的転換；
- 高等植物に有効な形態へのN固定。

しかしながら、ある土壤生物は植物生産に有害ないし不適當である。例えば、アリ、アブラムシ、植物食性線虫は深刻な害虫であり、若干の微生物、細菌および放線菌も植物病を発生させる。殆どの損害は糸状菌によって起こされ、大抵の土壤源性作物病の理由となる。

人類は一般に、特定の場所において自然界に存在する集団がもっている土壤の生物学的多様性に対して影響を（生態学および進化的力からの必然的帰結として）加えはじめる。しかし、彼らはまた新生物を導入する能力も持ち、また種々の管理行為を通じて、自然に存在するあるいは導入された土壤生物相に選択的圧力を加える。これは土壤肥沃度と作物生育を増加するために土壤生物とその活性を制御する機会を提供する。これらの共同体を管理するためには充分なことが理論上では知られているが、適したレベルの生物学的農業（biological husbandary）および生物学的な資源の最適管理（optimal management）を達成するためには、多くの基礎的および応用的研究が求められている。

文献

- Bouché, M.B. 1977. Stratégies lombriciennes. *Ecol. Bull.*, 25: 122-132.
- Brown, G.G., Pashanasi, B., Gilot-Villenave, C., Patrón, J.C., Senapati, B.K., Giri, S., Barois, I., Lavelle, P., Blanchart, E., Blakemore, R.J., Spain, A.V. & Boyer, J. 1999. Effects of earthworms on plant production. In P. Lavelle, L. Brussaard & P.F. Hendrix, eds. *Earthworm management in tropical agroecosystems*, pp. 87-147. Wallingford, UK, CAB International.
- Coleman, D.C., Ingham, R.E., McClellan, J.F. & Trofymow, J.A. 1984. Soil nutrient transformations in the rhizosphere via animal-microbial interactions. In J.M. Anderson, A.D.M. Rayner & D.W.H. Walton, eds. *Invertebrates-microbial interactions*, pp. 35-58. Cambridge, UK, Cambridge University Press
- FAO. 2000. *Guidelines and reference material on integrated soil and nutrient management and conservation for farmer field schools*. 164 pp.
- Hurpin, B. 1962. Super-Famille des Scarabeoidea. In A.S. Balachowsky, ed. *Entomologie appliquée à l'Agriculture. Tome I. Coléoptères*, pp. 24-204. Paris, Masson.
- Ingham, R.E., Trofymow, J.A., Ingham, E.R. & Coleman, D.C. 1985. Interactions of bacteria, fungi and their nematode grazers: effects on nutrient cycling and plant growth. *Ecol. Mono.*, 55: 119-140.
- Lavelle, P. 1981. Strategies de reproduction chez les vers de terre. *Acta Oecol.*, 2: 117-133.
- Lavelle, P. & Spain, A. 2001. *Soil ecology*. Dordrecht, Netherlands, Kluwer Academic Publishers.
- Lee, K.E. 1985. *Earthworms: their ecology and relationships with soils and land use*. New York, USA, Academic Press. 411 pp.
- Lee, K.E. & Wood, T.G. 1971. *Termites and soils*. London, Academic Press.
- Ponge, J.F. 1991. Food resources and diets of soil animals in a small area of Scots Pine litter. *Geoderma*, 49: 33-62.
- Soltner, D. 1978. *Phytotechnie Générale. Les bases de la production végétale*. Tome 1, Le Sol. 7ème édition. Collection sciences et techniques agricoles. Angers.
- Swift, M.J., Heal, O.W. & Anderson, J.M. 1979. *Decomposition in terrestrial ecosystems*. Oxford, UK, Blackwell Scientific Publications.
- Villalobos, E.J. & Lavelle, P. 1990. The soil coleoptera community of a tropical grassland from Laguna Verde, Veracruz (Mexico). *Rev. Ecol. Biol. Sol.*, 27(1): 73-93.
- Wallwork, J.A. 1970. *Ecology of soil animals*. London, UK, McGraw Hill.
- Wood, T.G. 1996. The agricultural importance of termites in the tropics. *Agr. Zool. Rev.*, 7: 117-155.
- Yeates, W.G. & Coleman, D.C. 1982. Role of nematodes in decomposition. In D.W. Freckman, ed. *Nematodes in soil ecosystems*, pp. 55-80. Austin, USA, University of Texas Press.

付録2. 土壌の諸性質に対する有機物の影響

土壌有機物は土壌の化学的および物理的諸性質と全体的な健全性に影響を与える。有機物に影響された諸性質は；土壌構造；容水量；土壌生物の多様性および活性（このいずれも作物生産に有益であったり有害であったりする）および栄養の有効性、を含む。それはまた化学的改良剤、肥料、殺虫剤および除草剤などの効果に影響を及ぼす。

土壌有機物は、分解の最初の段階で速やかに無機化する易分解性化合物から、分解の進行した段階で微生物の副産物のように蓄積してくる、より抵抗性の（分解し難い）残渣に至る一連の化合物から成る（Duxbury, SmithとDoran, 1989）。

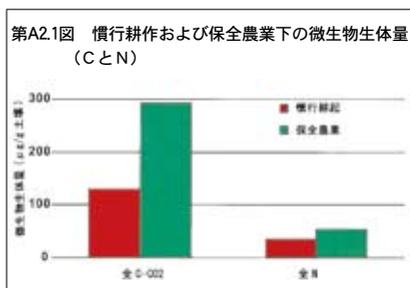
新たに加わったりあるいは部分的に分解した植物残渣およびそれらの非腐植の分解産物が易分解性有機物溜りを構成する。より安定な腐植物質はそれ以上の分解により抵抗的である。分解性土壌有機物が土壌の栄養供給力を制御するのに対して、易分解性および安定的溜りの両方が団粒形成や構造の安定性のような土壌の物理的諸性質に影響する。作物が収穫されあるいは残渣が焼却される時には、有機物は系から取除かれる。しかしながら、その損失は、植物根を土壌中に残すか作物残渣を表面に残すことによって、最小限に止めることができる。有機物は緑肥作物の作付け、農・林業種からの挿し木、および厩肥および堆肥の添加によってもまた回復することができる。土壌有機物は、土壌の生命および広範な土壌生物によって与えられる多様な機能にとって、鍵である。

生物学的諸性質

土壌微生物は、直接に栄養素の生物地質学的循環（biogeochemical cycles）中で相互作用するので、植物栄養にとって非常に重要である。

緑肥あるいは作物バイオマス量の地上・地下での増産は、土壌中における微生物集団の餌源を増す。残渣が地上表面に一根が土壌中に残される、例えば直播あるいは被覆作物の使用のような、農業生産体系は土壌微生物の発達および活性を刺激する。ブラジルにおける19年間の実験において、そのような方法は微生物炭素バイオマス（microbial carbon biomass）に129パーセント、微生物Nバイオマス（microbial nitrogen biomass）に48パーセントの増加をもたらした（第A2.1図）。

殆どの植物の根は菌根菌に感染している



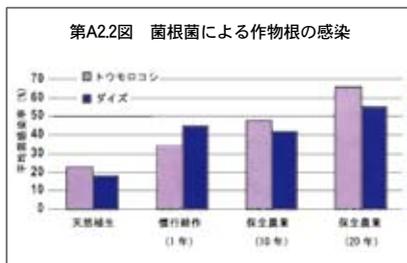
Source: Balota, Andrade and Colozzi Filho, 1996.

が、この糸状菌は根の上で菌糸即ち糸の網目構造を形成し根の表面積を拡張する。

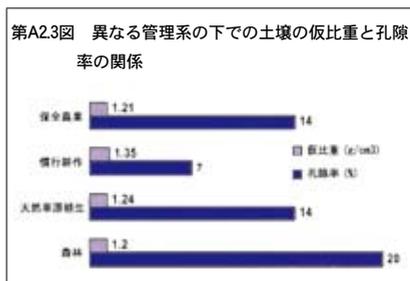
保全農業のような攪乱されない土壌生態系においては菌根菌による感染は、自然植生下に比べて時と共に増加する（第A2.2図）。細根は栄養摂取が最も活発な場所である為菌根菌の発達する主な場所である。このことは不攪乱状況下において発根条件が慣行耕作に比して遥かに良いため、菌根菌感染が増加することを一部説明する。菌根菌発達を刺激する可能性がある他の要因は有機炭素（C）の増加および被覆作物/緑肥種と作物との輪作である。

有機物増加のもうひとつの結果はミミズ数の増加である。ミミズは、特徴的な羞明（photophobia）、色素沈着（pigmentation）の欠如および水没期間や降雨期間の嫌気的条件への耐性の欠如ゆえに、土壌表面に出てくることはめったにない。土壌水分は土壌中にミミズ棲息を決定する最も重要な要因のひとつである。被覆植物と作物残渣により、蒸発が減少し、土壌中の有機物が増加し、ひいてはより多くの水が貯えられるのである。

土壌表面の残渣はその残渣を土壌中に引き込もうとするミミズを表面に誘い出す。ミミズの削孔活動は空気および水の経路を創る；これは根圏における酸素拡散およびそこからの排水に重要な効果をもつ。更に栄養と改良剤の分配が容易になり、根系が、殊に糞が存在する酸性下層土で、発達できる。浅く棲むミミズは表土中で多くの経路を創り、全孔隙を増し、従って仮比重を低下させる（第A2.3図）。深削孔性のミミズによって創られる大きな垂直の経路は非常に強い降雨条件下で水浸透を増加する。



Source: Venkze Filho et al., 1999.



Source: Gussen and Gussen, 1996.

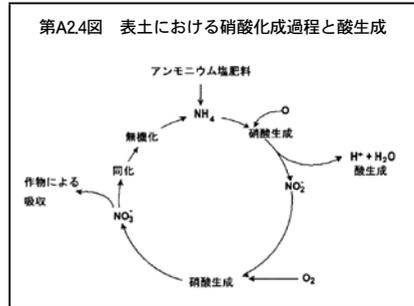
化学的諸性質

土壌有機物の多くの重要な化学的性質は腐植の弱酸性に由来している。有機物が植物に利用可能な陽イオンを保持し且つ溶脱からそれらを保護する能力、すなわち有機物の陽イオン交換容量（CEC）は、水素（H）（イオン）が中和に伴って弱酸から除去される際生ずる負荷電によって、多くの酸生成反応が土壌中で連続的に起こっている。これらの酸のあるものは微生物による有機物分解の結果として、あるいは根の分泌または無機物質の酸化によって生成する。普通に使用される肥料は微生物によるアンモニウム（ NH_4 ）の硝酸（ NO_3 ）への変換により、特に尿素、モノまたはジ-リン酸アンモニウムのようなアンモニウム肥料は、硝酸生成過程を経て速やかに硝酸に変換され、酸を放出し表土の酸性度を増大する（第A2.4図）。

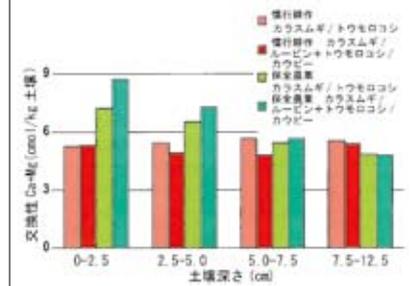
酸あるいは塩基が土壌に加えられる際には、有機物はpH変化を減少すなわち緩衝する。これが、土壌pHを上げるには、土壌溶液中に存在する遊離H（イオン）を単純に中和するのに必要な量に比べて多く、石灰を何トンも必要とするかという理由である。強酸性土壌（pH4）中の水中の全遊離水素イオンは、もっと少ないヘクタール当り6 kg以下の石灰で中和が可能である。しかしながらこれらの土壌で酸感受性植物を生育させるよう酸度を中和するには、ヘクタール当り5ないし24トン以上が必要とされる。土壌pHを上げるために中和しなければならない酸の殆どすべては、有機酸にあり、pHが非常に低い場合にはアルミニウム（Al）が関与している。

しかし有機物が多ければ、pHは急激には低下せず圃場に頻回に石灰施用する必要も無くなる。隔2-3年毎に1-2トン/ヘクタールの石灰施用で酸性度を制御できよう。

低粘土含量の土壌あるいは低CEC粘土を含有する土壌では、有機物が殆ど全てのCECおよびpH緩衝能を提供することもある。ブラジルにおける慣行耕作と保土耕作の比較では、最高の土壌CEC、交換性カルシウム（Ca）およびマグネシウム（Mg）の値は、マメ科を基本とした輪作体系で、有機物が最高の場合に認められた（第A2.5図）。殊にピジョンピーとフジマメの区は、休耕/トウモロコシ区に比してCEC



第A2.5図 慣行耕作との比較における9年間の保土農業後の交換性カルシウムおよびマグネシウム



Source: Mielniczuk, 1996.

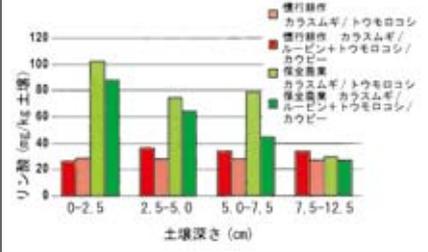
が70パーセント増加した。

有機物は土壤中で分解してゆく際に、N、リン酸（P）およびイオウ（S）を含む植物栄養素を放出する。マメ科種は、穀作物輪作の一部として根住細菌（root dwelling bacteria）との共生関係を通ずる大気からのN固定能の観点から非常に重要である。再度ブラジルの例では、カラスムギとクローバをトウモロコシとカウピーに輪作する集約体系の開始後5年目で、慣行耕起による伝統的カラスムギ/トウモロコシ体系より0~17.5cm土壌層の全土壌Nが490kg/ha多かったのである。9年後には、不耕起と集約的作付け体系の組み合わせが、慣行耕作と比較して、土壌Nの24パーセント増加をもたらした。植物によるN吸収は、恐らくN有機化と有機物の形成のため、不耕起区が低かったのだが、異なる耕作法のトウモロコシ収量は同じであった。不耕起法はマメ科被覆作物から土壌Nを表層土に貯えることにおいてより効率的であったので、長期的にはこの体系がトウモロコシ生産に有効な土壌Nを増加させたのである（Amado, FernandezとMiel-niczuk, 1998）。

CalegariとAlexander（1998）は被覆作物区において9年後に表層（0~5cm）のP含量（無機Pおよび全P）がより高いことを認めた。殊に残渣が表面に残された場合には、被覆作物は重要なP再循環能を持っていることが示されたのだ。このことは休閑区において特に明らかであった。そこでは慣行耕作区は不耕起区よりもP含量が25パーセント低かったのである。被覆作物によるその増加は2および約30パーセントの間に及んだ。更に重要なのは土壌中のP有効性の増加に対する整地法の効果であった（第A2.6図）。

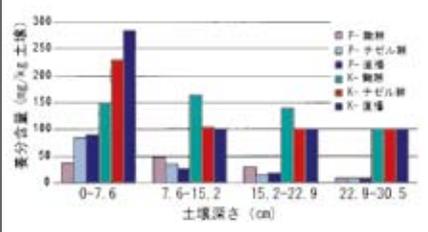
集約的生産体系を開始して3ないし5年後には、Pおよびカリウム（K）は表土に集積される。第A2.7図は鋤耕がそれらの養分の土壌断面に、少なくとも表層20~30cm（鋤込み深）において均等な分布へと導くことを示した。他方、直播を実施し作物残渣を表面に残した場合には、栄養素の50~75パーセントは土壌表層に集中していた。

第A2.6図 慣行耕作との比較における9年間の保全農業後のリン酸含量



Note: P content of the soil (0-10 cm) was 9 mg/kg in 1985.
Source: Mielniczuk, 1996.

第A2.7図 異なる整地法および異なる土壌深さにおけるリン酸（P）およびカリウム（K）含量



Source: Cruz, 1982.

物理学的諸性質

有機物は様々な道筋で土壌の物理学的諸性質に影響を与える。土壌表面を蔽う植物残渣は土壌を雨滴の衝撃による封鎖と皮殻形成 (sealing and crusting) から保護し、その際雨水の浸透を増し表面流去を減ずる。また有機物の増加は間接的に土壌孔隙に (土壌動物相増加を経て) 寄与する。新鮮な有機物はミミズのような大型動物相の活動を刺激するが、それらは体からの接着剤様の分泌物 (glue-like secretion) で裏打ちされ、処々に糞物質で充填された削孔を創りだす。表面浸透は、団粒形成とそれらの安定性、孔隙の連続性と安定性、亀裂の存在および土壌表面条件などを含む多くの要因に依存する。

更に有機物は、細菌の廃棄産物、有機ゲル、糸状菌菌糸やミミズ分泌物および糞などの有機物質の結合あるいは粘着性を通じて、土壌団粒および孔隙の安定性に寄与する。その上、無機土壌物質と緊密に混合した有機物は容水量増加に顕著な影響を及ぼす。

作物残渣の質、特に化学的組成は土壌構造と団粒への影響を決定する。

土壌有機物の利益

上記のように、有機物に富み、従って生きた生物に富んでいる土壌の利益は数多くある。直接的な有機物の改良剤には：

- コンポスト；
- 動物厩肥；
- 虫コンポストの使用 (vermicompost)；
- 廃棄汚泥の使用、などがある。

有機物に寄与する作物管理法を含むものは：

- 改良作付け体系および輪作；
- 植物被覆作物 (plant cover crops)；
- 作物残渣の最大化およびその管理；
- 根系発達の改良、などである。

温度および湿度は分解速度及び有機物と栄養素の一般的な循環に影響するので、管理法の効果は大いに農業微気象条件に依存する。

農民にとって土壌有機物の利益は以下の事項を含む：

- 投入費用の減少：栄養循環の改良および根域からの溶脱の減少による肥料必要量の減少；生物間の害虫 - 捕食者相互作用および自然の生物的制御による殺虫剤必要量の減少；保全農業法のもとでの大型動物相による生物的耕作による耕起費用の減少。
- 収量および作物品質の改善：土壌有機物および土壌生物多様性が、土壌構造改良、根伸長と菌根菌の発達、水および栄養の利用効率改良に寄与し、従って根および塊

茎の発達および植物地上部の生産に寄与する。土壌および作物の健全性は病原性生物の衝撃を和らげる。

- ▶汚染防止：土壌有機物が解毒化能を持ち、地下水および地表水供給源に汚染源となりうる過剰栄養素を吸収する土壌生物の生物学的活性を増大する。土壌有機物は炭素隔離（carbon sequestration）の重要な手段であり、有機物管理法が炭素貯蔵（C storage）(0.5t/ha/年以下)と温室効果ガス発生減少に寄与する。

土壌有機物および分解

土壌有機物を構成するのは、植物の生きた部分（主に根）、有機物質の死んだ形態（主として死んだ植物部分）、およびいろいろな分解段階に存在する土壌生物（微生物及び土壌動物）である。それは土壌の化学的、物理的および生物学的諸性質に大きな影響を持っている。土壌中の有機物は土壌に良い構造を与え、土壌が水を吸収し養分を保持できるようにする。それはまた炭素化合物からエネルギーを、タンパク質生成のためにNを、またその他の栄養素を供給することで土壌生物相の生長と生命（活動）を促進する。有機物が分解する際には、栄養素が土壌中に放出されて植物に役立てられる。従って、土壌中の有機物の量と型は土壌中におけるこれらの栄養素の量と有効性を決定する。それはまた土壌の色にも影響する。

死んだ物質は土壌中の全有機物の約85パーセントを構成する。生きている根は約10パーセント、また微生物と土壌動物が残り占める。

完全に分解した有機物は腐植（humus）と呼ばれる。腐植の生成後は物質の起源を認識することはできない。腐植は暗色で植物養分に非常に富んでいる。それは通常土壌断面の最上層に見られる。腐植の暗色は太陽からの熱を吸収して、それに伴って寒冷な気候条件下における植物生育と微生物活動のために土壌温度を改善する。

土壌中における有機物の最も重要な機能の幾つかは：

- ▶陽イオンを保持し、栄養を有機態で保全して植物の吸収と生長のために要求される養分を緩慢に放出する故、土壌肥沃度を増大する。
- ▶土壌粒子と一緒に結合する；土壌構造および通気を改良する接着および団粒化機能。
- ▶土壌中でスポンジとして機能し、土壌水分を保持する。高有機物含量の土壌は低有機物含量のものよりもより多くの水を保持することができる。
- ▶土壌中で生きる微生物のために餌を供給する。

分解は死んだ有機物がより簡単な状態へと転化し、それと同時にエネルギーおよび含んでいる生物学的栄養その他の元素を無機形態へと解放する過程である。ある形態の有機物は微生物および植物によって同化され、他の土壌有機物は物理的あるいは化学的過程によって安定化するかあるいは更に分解されてゆく（LavelleとSpain, 2001）。これらの死んだ有機物の同化可能な形態への転化は、無機化および腐植化の

同時的で相補的な過程を含む：

- ▶無機化は生物組織内の有機物に含まれている元素が硝酸、リン酸あるいは硫酸イオンのような無機形態に転換される過程である。
- ▶腐植化は代謝作用 (anabolic process) による過程でありその際有機分子は濃縮して分解抵抗性の有機高分子に凝縮される。後者は殆ど変化することなく数十年あるいは数世紀に亘ってさえ存続する可能性がある。

分解は本質的に生物学的な過程である。植物によって摂取される栄養素は大部分分解過程から得られる。微生物は断然に土壤呼吸への主たる貢献者であり、吐き出される二酸化炭素 (CO₂) 従って呼吸される有機Cの80~95パーセントの原因となっている (Satchell, 1971; Lamotte, 1989)。それ故分解は三つの因子：生物、環境条件 (気候および土壤中に存在する鉱物)、および分解資源の質の相互作用によって決定される過程である (Swift, HealとAnderson, 1979; AndersonとFlanagan, 1989)。これらの因子は異なる空間的および時間的尺度で作用する (Lavelleら、1993)。

生きた生物は数千の異なった化合物からできている。それ故生物が死ぬと、土壤中に分解を待つ数千の化合物がある。これらの化合物が分解されるにつれ、土壤中の有機物は次第に変性して遂には最早元の植物の部分として見分けられなくなる。この過程における諸段階は：

1. 易分解性化合物、例えば糖類、デンプン類およびタンパク質の分解。
2. 分解に数年掛かる物質、例えばセルロース (植物中に見られる不溶性炭水化物) およびリグニン (木部の一部である非常に複雑な構造)。
3. 分解に十年ほども掛かることもある化合物、例えば若干のワックスとフェノール類の分解。この段階は安定な結合を形成し土壤団粒内部に深く位置し、それ故に土壤微生物に接近することの無い化合物を含む。
4. 分解に数十、数百、あるいは数千年を要する化合物の分解。これらは植物の分解生成物および微生物により生成された化合物の総合化の結果である腐植様物質を含む。

易分解性の糖類、デンプン類およびタンパク質類は糸状菌および細菌が速やか且つ容易に分解するので、それらが供給するCおよびエネルギーは容易に利用できる。

土壤中に棲息する微生物の大部分はこれらの簡単な化合物を分解するのに必要な酵素を分泌することができる。より大きなダニ類および小さな動物はしばしば分解の第一段階で有機物をより小さな破片に破壊し、材料のより多くを細菌と糸状菌が定着できるよう曝露して助ける。

分子の酵素による分解で生じたエネルギーと栄養素のあるものは細菌や糸状菌それ自身の成長のために使われる。例えば、ある酵素があるタンパク質の分解を刺激する時、微生物はそのC、N、Sを自らの生理的過程と細胞構造のために使うことができる。若し微生物たちが使わない養分があれば、それら養分はほかの土壤微生物や植物

が吸収し、利用できる。微生物が死ぬと、その細胞は分解し、それらに含まれていた栄養分は植物や他の土壌生物に有効になる。

分解の第二段階は多くの糸状菌と細菌種によるより複雑な化合物の分解を含む。それらはより大きくより複雑な単位から構成されているので分解にはより長く掛かる。大抵の微生物によっては通常生産されない特別な酵素がこれらの化合物を分解するのに要求される。

分解は諸条件が適した処でのみ起こる。非生物的条件は分解速度に顕著な影響を持つ。利用しうる若干の水分が無くてはならず、土壌温度は適当でなくてはならない(通常10と35℃の間)。そして土壌は極端に酸性またはアルカリ性であってはならない。分解はまたコンポストの中のように、高い温度においても起こり、あるいは湛水条件下に於いても嫌氣的過程を通じて起こる。有機物分解に含まれる生物の型もまた諸条件に依存する。

有機物の型、それらが土壌に施用されるか取り込まれる方法、およびそれらが分解してゆく様相などは土壌中に於ける物理的、化学的、また生物学的均衡に影響し種々の衝撃を決定する。それが変え得るのは：

- 植物に利用できるNの量；
- その他の有効栄養素の量；
- 如何に土壌が結合するか（土壌団粒）；
- 土壌中に存在する生物の数と型。

微生物は植物よりも容易に土壌中のNを利用できる。これは全土壌生物に十分なNが無い場合、植物は恐らくN欠乏になるであろうことを意味する。土壌が有機物に乏しい場合には、有機物施用は増加した微生物活性を通じて植物に利用できるN量（および他の栄養素）を増加する。土壌中の微生物数もまた、有機物をエネルギー源として利用できるのも、増加する筈である。糸状菌および細菌数が有機物分解に伴って増加する処では、土壌構造へ何らかの改善が起こり得る。有機物添加はまたミミズの活動を増し、ひいては土壌団粒形成をも改良することができる。

文献

- Amado, T.J.C., Fernandez, S.B. & Mielniczuk, J. 1998. Nitrogen availability as affected by ten years of cover crop and tillage systems in southern Brazil. *J. Soil Wat. Con.*, 53(3): 268–271.
- Anderson, J.M. & Flanagan, P. 1989. Biological processes regulating organic matter dynamics in tropical soils. In D.C. Coleman, J.M. Oades & G. Uehara, eds. *Dynamics of soil organic matter in tropical ecosystems*, pp. 97–125. Nifal Project. University of Hawaii, USA.
- Balota, E.L., Andrade, D.S. & Colozzi Filho, A. 1996. Avaliações microbiológicas em sistemas de preparo do solo e sucessão de culturas. In: *I Congresso Brasileiro de Plantio Direto para uma Agricultura Sustentável*, pp. 9–11. Resumos expandidos. Ponta Grossa.
- Calegari, A. & Alexander, I. 1998. The effects of tillage and cover crops on some chemical properties of an oxisol and summer crop yields in south-western Paraná, Brazil. *Adv. Geo. Ecol.*, 31: 1239–1246.
- Cruz, J.C. 1982. *Efecto de la rotación de cultivos y de los sistemas de laboreo sobre algunas propiedades del suelo; distribución radicular y rendimiento*. Cited by Monsanto, 2001. Universidad Purdue. (Tesis doctoral)
- Duxbury, J.M., Smith, M.S. & Doran, J.W. 1989. Soil organic matter as a source and sink of plant nutrients. In D.C. Coleman, J.M. Oades & G. Uehara, eds. *Dynamics of soil organic matter in tropical ecosystems*, pp. 33–67. USA, University of Hawaii Press.
- Gassen, D.N. & Gassen, F.R. 1996. *Plantio direto. O caminho do futuro*. Aldeia Sul, Passo Fundo. 207 pp.
- Lamotte, M. 1989. Place des animaux détritviores et des microorganismes décomposeurs dans les flux d'énergie des savanes africaines. *Pedobiologia*, 33: 17–35.
- Lavelle, P. & Spain, A. 2001. *Soil ecology*. Dordrecht, The Netherlands, Kluwer Academic Publishers.
- Lavelle, P., Blanchart, E., Martin, A., Martin, S., Spain, A.V., Toutain, F., Barois, I. & Schaefer, R. 1993. A hierarchical model for decomposition in terrestrial ecosystems: application to soils of the humid tropics. *Biotropica*, 25(2): 130–150.
- Mielniczuk, J. 1996. A sustentabilidade agrícola e o plantio direto. In R. Trippia dos Guimarães Peixoto, D.C. Ahrens & M.J. Samaha, eds. *Plantio direto: o caminho para uma agricultura sustentável*. Palestras do I Congresso Brasileiro de Plantio Direto para uma Agricultura Sustentável. Ponta Grossa 1996. 275 pp.
- Pauletti, V. 1999. A importância da palha e da atividade biológica na fertilidade do solo. In: *Fertilidade do Solo em Plantio Direto*, pp. 56–66. Resumos de Palestras do III Curso sobre aspectos básicos de fertilidade e microbiologia do solo em plantio direto. Passo Fundo.
- Satchell, J.E. 1971. Feasibility study of an energy budget for Meathop Wood. In P. Duvingneaud, ed. *Productivité des Ecosystèmes Forestiers*, pp. 619–630. Paris, UNESCO.
- Swift, M.J., Heal, O.W. & Anderson, J.M. 1979. *Decomposition in terrestrial ecosystems*. Oxford, UK, Blackwell Scientific Publications.
- Venzke Filho, S.P., Feigl, B.J., Sá, J.C.M. & Cerri, C.C. 1999. Colonização por fungos micorrízicos arbusculares em milho e soja em uma cronosequência de sistema plantio direto. *Rev. Plan. Dir.*, 54: 34.

FAO SOILS BULLETINS

- 1 Soils of the arid zones of Chile, 1965 (E*)
- 2 A survey of soils laboratories in sixty-four FAO member countries, 1965 (E*)
- 3 Guide on general and specialized equipment for soils laboratories, 1966 (E*)
- 4 Guide to sixty soil and water conservation practices, 1966 (E*)
- 5 Selection of soil for cocoa, 1966 (E* F* S*)
- 6 Aerial photo interpretation in soil survey, 1967 (C* E* F* S*)
- 7 A practical manual of soil microbiology laboratory methods, 1967 (E*)
- 8 Soil survey interpretation and its use, 1967 (E*)
- 9 The preparation of soil survey reports, 1970 (E* F* S*)
- 10 Physical and chemical methods of soil and water analysis, 1970 (E F S)
- 11 Soil fertility investigations on farmers' fields, 1970 (E F S*)
- 12 The response of wheat to fertilizers, 1971 (E)
- 13 Land degradation, 1971 (C* E*)
- 14 Improving soil fertility in Africa, 1971 (E* F*)
- 15 Legislative principles of soil conservation, 1971 (E*)
- 16 Effects of intensive fertilizer use on the human environment, 1972 (E)
- 17 Trace elements in soils and agriculture, 1972 (E F S*)
- 18 Guide to the calibration of soil tests for fertilizer recommendations, 1973 (E S*)
- 19 Soil survey interpretation for engineering purposes, 1973 (E F* S*)
- 20 Fertilizer legislation, 1973 (E* S)
- 21 Calcareous soils, 1973 (E* F*)
- 22 Approaches to land classification, 1974 (E*)
- 23 Management properties of ferralsols, 1974 (E)
- 24 Shifting cultivation and soil conservation in Africa, 1974 (E* F S)
- 25 Sandy soils, 1975 (E*)
- 26 Planning and organization of fertilizer development in Africa, 1975 (E*)
- 27 Organic materials as fertilizers, 1975 (E* F* S*)
- 28 S.I. Units and nomenclature in soil science, 1975 (E)
- 29 Land evaluation in Europe, 1975 (E*)
- 30 Soil conservation for developing countries, 1976 (Ar C* E* F* S*)
- 31 Prognosis of salinity and alkalinity, 1976 (E)
- 32 A framework for land evaluation, 1976 (C* E* F* S*)
- 33 Soil conservation and management in developing countries, 1977 (E F)
- 34 Assessing soil degradation, 1977 (E*)
- 35 Organic materials and soil productivity, 1977 (C* E)
- 36 Organic recycling in Asia, 1978 (C* E*)
- 37 Improved use of plant nutrients, 1978 (C* E)
- 38/1 Soil and plant testing and analysis, 1980 (E)
- 38/2 Soil and plant testing as a basis of fertilizer recommendations, 1980 (E* S*)
- 39 Salt-affected soils and their management, 1988 (Ar E)
- 40 China: recycling of organic wastes in agriculture, 1977 (E F* S)
- 41 China: azolla propagation and small-scale biogas technology, 1978 (E* F S)
- 42 Soil survey investigations for irrigation, 1979 (C* E F)
- 43 Organic recycling in Africa, 1980 (E)
- 44 Watershed development with special reference to soil and water conservation, 1979 (C* E F S*)
- 45 Organic materials and soil productivity in the Near East, 1982 (E with Arabic summary)
- 46 Blue-green algae for rice production + a manual for its promotion, 1981 (E)
- 47 Le recyclage des résidus agricoles organiques en Afrique, 1982 (F)
- 48 Micronutrients and the nutrient status of soils: a global study, 1982 (E)
- 49 Application of nitrogen-fixing systems in soil management, 1982 (C* E F S*)
- 50 Keeping the land alive: soil erosion + its causes and cures, 1983 (E F S)
- 51 El reciclaje de materias orgánicas en la agricultura de América Latina, 1983 (S*)
- 52 Guidelines: land evaluation for rainfed agriculture, 1983 (C* E F S)
- 53 Improved production systems as an alternative to shifting cultivation, 1984 (E F S)
- 54 Tillage systems for soil and water conservation, 1984 (C E F S*)
- 55 Guidelines: land evaluation for irrigated agriculture, 1985 (C E F S)
- 56 Soil management: compost production and use in tropical and subtropical environments, 1987 (E F S)
- 57 Soil and water conservation in semi-arid areas, 1987 (C E F)
- 58 Guidelines: land evaluation for extensive grazing, 1991 (E)
- 59 Nature and management of tropical peat soils, 1988 (E)
- 60 Soil conservation for small farmers in the humid tropics, 1989 (E S)
- 61 Radioactive fallout in soils, crops and food, 1989 (E F S)
- 62 Management of gypsiferous soils, 1990 (Ar** E)
- 63 Micronutrient assessment at the country level: an international study, 1990 (E)
- 64 A study of the reasons for success or failure of soil conservation projects, 1991 (E F S)
- 65 Status of cadmium, lead, cobalt and selenium in soils and plants of thirty countries, 1992 (E)
- 66 Manual de sistemas de labranza para América Latina, 1992 (S)
- 67 Agro-ecological assessments for national planning: the example of Kenya, 1993 (E)

68	Field measurement of soil erosion and runoff, 1993 (E F S)	76	Land and crop management in the hilly terrains of Central America: lessons learned and farmer-to-farmer transfer of technologies, 1999 (E S)
69	Soil tillage in Africa: needs and challenges, 1993 (E)	77	Soil management and conservation for small farms: strategies and methods of introduction, technologies and equipment, 2000 (E S)
70	Land husbandry: components and strategy, 1996 (E F)	78	Conservation agriculture – case studies in Latin America and Africa, 2001 (E S)
71	Tillage systems in the tropics: management options and sustainability implications, 1995 (E)	79	Optimizing soil moisture for plant production – the significance of soil porosity, 2003 (E, S)
72	Sustainable dryland cropping in relation to soil productivity, 1995 (E)	80	The importance of soil organic matter – key to drought-resistant soil and sustained food production, 2005 (E)
73	Agro-ecological zoning - guidelines, 1996 (E)		
74	Guidelines for quality management in soil and plant laboratories, 1998 (E)		
75	New concepts and approaches to land management in the tropics with emphasis on steeplands, 1999 (E S)		

Availability: October 2005

Ar	+	Arabic	Multil – Multilingual
C	+	Chinese	* Out of print
E	+	English	** In preparation
F	+	French	
P	+	Portuguese	
S	+	Spanish	

The FAO Technical Papers are available through the authorized FAO Sales Agents or directly from Sales and Marketing Group, FAO, Viale delle Terme di Caracalla, 00100 Rome, Italy.

訳者紹介

新井重光（あらいしげみつ）

1936年 生

1960年 東京大学 弘法健三教授に師事（土壌学を学ぶ）

以後農林水産省山崎伝博士（作物栄養学）、名古屋大学熊田恭一教授（土壌学）に師事。

1995年 国際協力事業団（現国際協力機構：JICA）長期専門家としてフィリピンで熱帯農業を学ぶ。
農学博士

土壌有機物の重要性 —早魃抵抗性土壌及び持続的食料生産への鍵—

(FAO Soil Bulletin 80)

2007年2月発行

翻 訳：新井重光

編集・発行：(社)国際農林業協力・交流協会

〒107-0052 東京都港区赤坂8-10-39

赤坂KSAビル

T E L : 03-5772-7880

F A X : 03-5772-7680

印 刷 所：よしみ工産株式会社

平成18年度 食料・農林業協力啓発促進事業 H18FAOPul-2007.2/300

土壌有機物の重要性

旱魃抵抗性土壌および 持続的食料生産への鍵

土壌有機物—その生物学的分解—が土壌の化学的および物理的諸性質を決定し、全体の健全性に影響をもたらす。

その組成および分解速度が影響するのは土壌構造と孔隙性；土壌の透水速度と含水量；土壌生物の多様性と生物学的活性；および植物栄養素の有効性などである。

本書は栽培土壌の有機物動態に焦点を絞り、有機物を減耗する状況とその好ましくない結果を論議している。

また、ここでは積極的な解決法を提起している。実例をできるだけ再検討し、如何にしてそれらの実践が有機物含量を増加させうるのかを示し、そこからもたらされる土地と作物の利益を明らかにする。