

目に見えない土の中の、作物と他の生きものとの関係

研究部 研究課

はじめに

私たち研究部土壤生物チームは「土の中」という目では直接見られない世界を対象に研究をしています。土の中の生きもの（土壤動物）を調査し、その役割を解明し、作物栽培への活用方法を確立することを目標としています。

私には元々「森林を支えているのは地下にいる土壤動物なのではないか？」という興味がありました。その興味を畑に移して、これから本格的な研究を始めるところです。

研究を進める中で、一番頭の痛い事は「土の中の本当の姿をそのまま見ることはできない」ということです。

土を掘れば、生きものを見ることができます。しかし、土と生きもの

の本当の関係、つまり「土がどのような状況で、そこに生きものがどのように棲んでいて、それぞれがどのように影響し合っているのか」ということは、土を掘って、土を壊してしまうてはさっぱり分からなくなってしまうのです。しかし土を壊さずに観察することはできません。

今回は、このような悩みの中から見えてきたこと、既知の面白い研究目指している研究の方向性について紹介します。

自然農法は地球を暖める!?

地球の温暖化は二酸化炭素などの温室効果ガスによつて起きるという説がありますが、「自然農法は温室効果ガスの削減にも貢献しているのではないか？」というテーマで、あ

る大学院の博士課程の方と共同で研究をしたことがあります (Nagano et al. 2012)。畑からも温室効果ガスが出たり吸収されたりしています。自然農法は肥料の量が少なく、土の中の養分や機能を有効に活用するため、温室効果ガスの放出量は少ないのではないか、という仮説です。

そこで、温室効果の高い二酸化炭素 (CO_2)、メタン (CH_4)、亜酸化窒素 (N_2O) という3種類のガスが、畑からどのくらい放出され、または吸収されているのかを調査しました。

まずは自然農法畑の土と、比較のために隣接する慣行農法の畑の土を採取して、実験室内でふるいにかけて小石や根などを取り除き、土からのくらの温室効果ガスが出ているか調べてみました。すると驚いた

ことに、自然農法畑の土からは慣行の約274倍もの亜酸化窒素が出ていました。亜酸化窒素は二酸化炭素の約300倍も温室効果があると言われていて、他のガスの量を合わせた総合的な温室効果も慣行農法畑より自然農法畑の土が遥かに高いという結果でした。

「生きものの力を使って栽培していくということは、地球を暖めていくということなのだろうか・・・」という思いが少し頭をよぎりました。

次に、野外の実験の畑でどのくらい温室効果ガスが放出されているのか、畑に直接ガス採取器を取り付けて測定してみました。すると、一年を通じて自然農法の畑から亜酸化窒素は室内実験ほど放出されていませんでした。

そして野外の畑における他のガス



の収支も含めて導き出された総合的な結論は「自然農法は慣行農法よりも温室効果ガスの削減に寄与しそうだ」というものでした。

実験室内と実際の畑で、まったく逆の結果が出たのは何故でしょうか。

室内実験と野外調査の違い

実はその理由はまだ分かっていません。しかしいくつか考えられる要因があります。

室内実験で測定した土は「いろいろな物を取り除くためにふるいにかけた状態」でしたが、野外調査の畑環境では「作物も雑草も、他の生きものもいて、雨が降ったり乾いたり…」いろいろな条件は違います。そして私は「土がふるいにかけられて立体構造が壊れているか、いないか」という違いがかなり大きな原因なのではないかと思っています。

土の構造というと団粒構造が有名で、この有無の影響もかなりあるのではないかと思います。しかし、もう少し大きなスケールの構造がより影響していて、ふるいをかけたことでその構造が壊されたため、結果と

して差が出たのではないかと考えています。

生きものが作る土壌構造 バイオポア

畑にはミミズをはじめ様々な生きものが棲んでいて、その生きものたちが土の中を移動すると、大小の孔（あな）が地中にできます。これを専門用語で「バイオポア」と呼びます。「バイオ」は「生きもの」、「ポア」は「細かい孔」という意味です。このような孔は作物の根が朽ちて腐ることによってもできます。

このバイオポアに関するフランスの研究例を紹介します。図1は土の中でミミズの孔がどのようにできていくのかを、直径16cm、深さ40cmの土壌をくり抜き、X線を用いて解析した画像です。白い部分が土、黄色や青色の部分が孔で、図の右側半分は8トンのトラクターの車輪が通ってからの時間経過による変化の様子、左半分は通っていないところのものです。地中には驚

くほど多数の孔があることもよく分かりますが、トラクターの車輪の圧でその孔は潰れてしまい、元通りまで回復するにはかなりの時間がかかりそうだという様子が伺えます。

このような孔は土の質やそこに棲む生きものによって、でき方や崩れ方が違いますが、先述した温室効果ガスを測定した畑は、掘っても崩れにくい土質で、観察しやすい状況にあり、写真を撮ることができました（次ページ写真1）。ここにはサク

ラミミズという桜色のミミズをはじめ、多数の生きものが生活し（次ページ表1）、多くの孔をあけていました。

バイオポアの機能

これらの孔は畑では一体どのような役割を担っているのでしょうか。東京大学の中元朋実氏によると、「物質の移動」と「根の生長」に影響していることが分かっています（中元1998）。

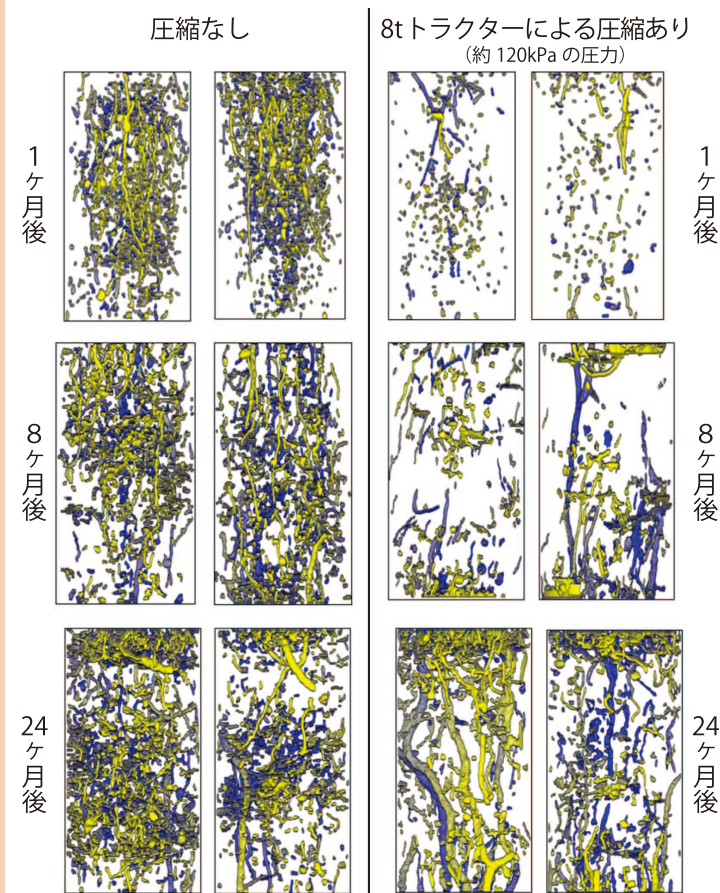


図1 ミミズが生息する畑の土壌コア（直径16cm、深さ40cm）のX線断層撮影（Yvan C et.al. 2012 より）
※着色部分が孔を示す（黄色：正面、青色：裏面）



写真1 自然農法畑の土壌にできたバイオポア

表1 自然農法と隣接慣行農法の畑における土壌動物
2010年7月(個体数/m²)

分類群	自然農法	慣行農法
ヒトツモンミミズ	32	
サクラミミズ	248	
ミミズ卵	8	
陸貝	4	
クモ	52	
ワラジムシ	12	
ヤスデ	12	
ジムカデ	12	
イシムカデ	112	8
コムカデ	8	
ゴミムシ	4	
コメツキムシ	12	
コメツキムシ幼虫	4	
コガネムシ	4	
コガネムシ幼虫	16	
ハネカクシ	56	4
ナガコムシ	8	
その他甲虫	60	
ハエ幼虫	4	12
チョウ幼虫	4	
ミミズ湿重(g)	41.36	
ミミズ以外湿重(g)	8.44	0.28
合計湿重(g)	49.80	0.28

が下がるのではないかと、また、孔に根が偏って伸びるため根全体としては吸収効率が落ちるのではないかとという見方があります。

また、孔が長期間壊れないと、その孔に沿って毎年作物の根が伸びるため、良くも悪くも前年の根についた微生物と出会いやすいという面もあるようです。菌根菌という、リン酸

などの養分を作物に供給してくれる微生物などとの出会いはプラスに働き、病原菌との出会いはマイナスに働くことでしょう。

つまり、バイオポアと根の関係は「良い」影響と「悪い」影響が複雑に絡み合っている現状です。

3. その他の影響

中元氏によると、バイオポアと作物の関係は、まだまだ未知の世界だそうです。この孔は土の中の様々な生きものの生活にも当然作用していると考えられ、その影響が間接的に作物にも影響していると推測されます。しかし、その辺りの研究は殆ど

1. 物質の移動

まず、孔を伝って水が大きく地下部へ移動するようになります。結果として地表は水はけが良くなり、大雨の時でも地表面を流れる水が減り、土壌侵食や冠水害が軽減されたり、雨上がりに地温が上がり易くなったたりすることが考えられます。

なお、この孔作りや土壌の団粒化は、ミミズが地面の下で水を得やすくする工夫の一つだと言われています(Turner 2000)。ミミズの祖先は水の中を棲みかとしていた生きものでしたが、進化して地中に進出し

てきた現在でも、水への要求が強くなります。そこでミミズは、自分が水を得やすいように土の中の環境を改変するようになったというのです。

話を元に戻しますが、水が流れれば、それに溶けた物質も流れます。当然、養分も流れていきます。養分

が下に流れていくことは良い場合も、悪い場合もあると思われます。乾燥すれば、孔を伝って空気も動

きます。地中深くに酸素を送り届ける役割がありそうですが、この辺りの研究はあまり進んでいません。

先述の室内実験での温室効果ガスの測定は、土をふるいにかけて、この孔を壊した状態だったことが、温室効果ガスがより多く出た一番の原因だと予想しています。亜酸化窒素は酸素が少ない環境でより多く発生しやすいからです。

2. 根の生長

植物の根も孔を通して伸びていきます。孔に沿って伸びる根は土を掘り進む力が不要なため、孔ができると根の伸長が良好になるという観察結果があります。しかし根と土が触れる面積が減るため、養分吸収効率



進んでおらず、これからの研究課題です。

ミミズ研究の第一人者である中村好男氏によると、ミミズの体を覆う粘液はアンモニアなどの窒素養分を豊富に含んでいます（中村1998）。ミミズが活動することで、その粘液や作物残渣などの有機物は孔の側面に付着していきます。そのような孔に沿って伸びていく根は、窒素養分などの獲得にかなり有利に働く可能性が考えられます。また、その孔に集中するミミズをはじめとした生きもののフンが養分豊富であることなど、いろいろな要因が、微生物やその他の生きものに影響し、結果的に作物の生長にもかなり影響を与えているに違いありません。それは今後の研究で明らかになってくるかと思っています。

虫の死骸で

トウガラシが辛くなる！

これまで述べてきたように、畑の土の中で生きものが孔を掘っているだけでも土の中の物質循環に大きな影響を与えたり、作物にとっていろいろな役割を与えたりしそうです。

が、次に、虫が畑の中にいるだけでも役割があるかもしれない、という話をご紹介します。

世界一辛いと呼ばれてきたトウガラシのうち、2011年5月にギネスブック記録を打ち立てたのは、オーストラリアの「トリニダードスコーピオンブッチー」という品種で、その辛さは一時期有名になったハバネロの3倍近くありました。

このトウガラシは、堆肥から出る排水を液肥に利用して栽培されましたが、2011年のAustralian Geographicの記事によると、その液肥によって辛さが引き出されたというのです。

堆肥の中ではミミズをはじめ数多くの虫が生まれては死んでいくので、その堆肥から出る排水は、それらの虫の死骸の抽出物を含んでいます。そして、それを吸ったトウガラシは「虫に襲われている」と錯覚し、虫に食われないために生体内に辛み成分を多く作るようになる、ということです。

もちろん、その辛いトウガラシも虫に食われることがあります。植物が作る防御物質に絶対の効果があるわけではありません。しかし、虫が

土の中で生活し、死んでいくという営みだけで、植物がそれに反応して、いくらかの害虫抑制効果がありそうなのです。

根が食われると

葉が元気になる？

似た話として、いわゆる害虫が土の中にいることが、地上部の害虫の抑制につながる可能性もあります。

オランダの研究事例に、根を食う虫がいると、植物の地上部が多く伸びたり、地上部につくアブラムシが繁殖しにくくなったりする観察結果があります（図2・図3）。

まだ仮説の段階ですが、虫に適度に根を食われることで、植物が危機感をいだき、代わりに地上部を伸ばす方により力を入れたり、防御物質を作ったりするのではないかと、また、その防御物質は植物の全身を巡り、結果的に根を食う虫のみならず、葉の汁を吸うアブラムシにも防御効果が発揮されるのではないかと考えられています。地上部と地下部は繋がっていて、互いに影響し合うようです。

多くの場合、飛来して葉や実を食

害する虫よりも先に、土の中の生きものは植物の根と出会っています。そして早く出会うことが、その後の葉を食害する虫との関係性にある程度決定する可能性は十分にあります。つまり、土の中のいわゆる害虫を含む様々な生きものとの適度な出会いが、作物栽培にとっても良い方向に役立っている場合があるかもしれないのです。

科学的に解明されてはいませんが、人間でも、子どもの頃に清潔な環境にだけいると、病原菌に対する抵抗力が弱まってしまったため、衛生環境もバランスが大切だという説があります。それと似ているかもしれません。

だからといって根の食害が多すぎても作物は育ちません。自然農法でキャベツの葉の虫害が少ない畑と多い畑でそれぞれ土壌動物を調査したことがあります。すると、どちらにも根を食うコガネムシの幼虫などがいましたが、葉の虫害の多い区はコガネムシの幼虫の数が多い区は（表2）。葉の虫害の多い区は根を食われすぎて抵抗力が低下してしまい、栽培がうまく行かなかった可能性があります。

もちろん、虫害の違いは様々な原因が考えられますが、このキャベツ畑に栽培に適した土壌動物の数やバランスのヒントがありそうです。これも、これからの研究課題です。

未知なる生きものの役割

土の中の生きものの役割は、本誌でこれまで、

- ・有機物の分解・養分の可吸化
- ・土の耕耘・団粒化
- ・害虫や病原菌の捕食
- ・クモやカエルなどのエサになりそれらを養うことによる間接的な害虫抑制
- ・鳥類などのエサになることによる生物多様性保全への貢献

などの可能性が紹介されてきました。そして今回は生きものが土の中で生活することで形成される土の構造や、害虫を含む生きものが生活しているだけで虫害が減る可能性について紹介してみました。しかしこれらは全てまだまだ研究途上です。

また、「土の中の生きものには○効果がある」という話は、化学農薬のような絶対的な効果があるというものではなく、「少々」の役割があ

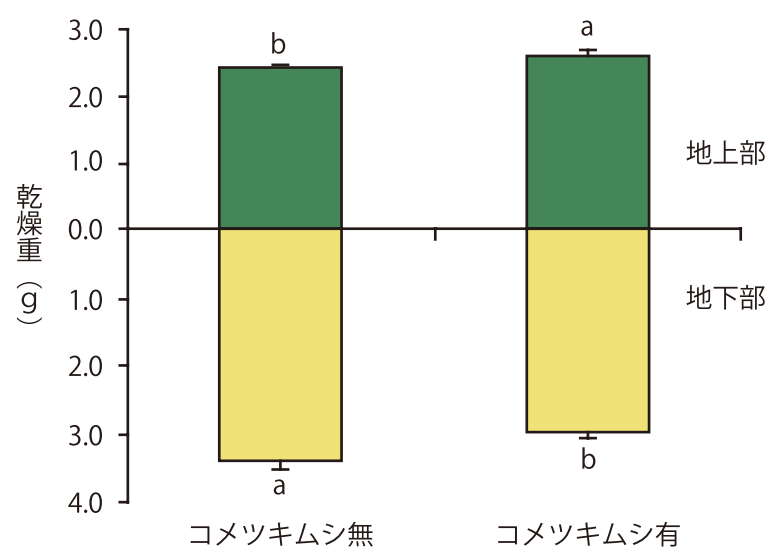


図2 コメツキムシ *Agriotes lineatus* がヘラオオバコの地上部および地下部に与える影響 (Wurst and Van der Putten 2007 より)

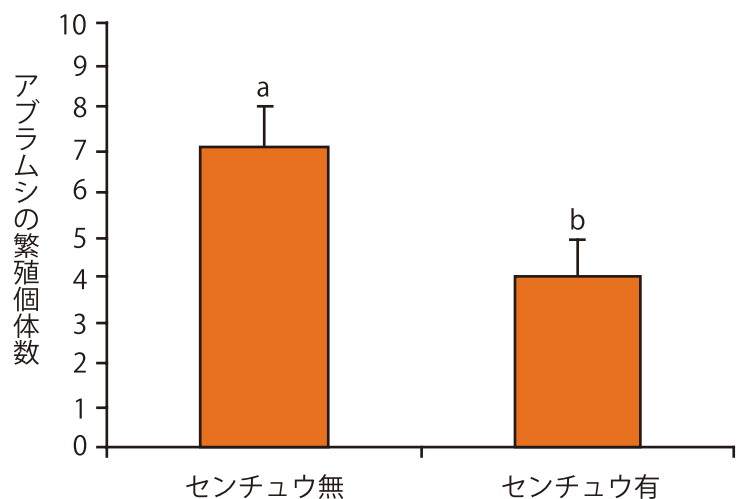


図3 キタネグサレセンチュウがモモアカアブラムシの繁殖に与える影響 (7日間) (Wurst and Van der Putten 2007 より)

る」程度の意味です。またその効果には副作用のようなものが伴う危険性もあり、必ずしも良い働きばかりではありません。しかし、チリも積もれば山となるように、その少々の良いまたは悪い効果の積み重ねが、大きな結果の差に繋がります。それを良い方向に持っていくのが、土の中の生きものを活用する栽培技術だと考えています。

生きものの世界は複雑で、土の中にはそれぞれがどのように影響し合っているのかは、なかなか見えません。そのような性質を嫌ってか、短期に成果が求められる現在の研究の世界では、土の中の生きものの研究はかなり遅れています。

他の研究分野でもそうですが、土壌動物の研究でも「分からない」とが多くあります。これまで述べて

きたように、根を食べるといような一見悪そうなのが実は良い影響を及ぼす可能性もあります。そのため単純に、作物を食べる虫を「害虫」とは呼べませんし、何をもって「益虫」と呼ぶかの判断も難しいところがあります。

しかも畑の生きものは、季節に応じて、栽培管理や周辺環境によっても、種類や数が変わっていき、ま

表2 自然農法キャベツ試験畑の土壌動物 2012年8月(個体数/m²)

類群	虫害少区	虫害多区	食性
クモ	8	3	虫を食べる
ジムカデ	21	40	虫を食べる
イシムカデ	8	72	虫を食べる
ハサミコムシ	8	19	虫を食べる
ハネカクシ	13	13	虫を食べるものが多い
ゴミムシ	3	3	虫を食べるものが多い
ゴミムシ幼虫		35	虫を食べるものが多い
ツチカメムシ		3	植物を食べる
カイガラムシ		3	植物を食べる
コメツキムシ		3	植物を食べる
コガネムシ	3	3	植物を食べる
ゾウムシ	5		植物を食べる
コメツキムシ幼虫	13		植物を食べる
コガネムシ幼虫	43	99	植物を食べる
ヤスデ	3		腐植(土)を食べる
マグソコガネ		3	腐植(土)を食べる
ハエ目幼虫	24	13	腐植(土)を食べる
その他甲虫	8	3	不明
その他甲虫幼虫	13	21	不明
合計群数	14	16	
合計個体数	173	336	

た、気候の影響などによる年ごとの変動も多くあり、とても複雑です。私はそこに悩ませられながらも、複雑さを解明することに面白さを感じています。

今後の研究方向

自然農法が栽培として成立している畑は、作物と、そこに棲む生きものの種類や数、生きものが作る土壌構造の関係が、不思議と良好になっているように思えます。その良好になるバランスこそが、自然農法で「土

の偉力」と呼ばれているものの一つの正体なのではないかと考えています。そのバランスと関係性を探っていくことが大きな研究課題です。

幸いにも、当センター農業試験場には生きものが極端に多様で、生きものが作る団粒やバイオポアなどの構造も多い畑があります。そこは先述の温室効果ガスの調査場所でもあるのですが、耕さず、種子以外には何も入れない無肥料栽培を12年間も続けています。そして、それでもきちんと作物ができています。これはそこに棲む生きものが未知の役割を果たしているからに違いありません。

私たちは、まずはその極端な畑と他の畑を比較し、生きものが土の養分の動きや作物の成分、地上部の生きものに与える影響を推定し、新たな栽培体系の確立に取り組んでいきます。

まだまだ研究途上ですが、自然観察の一つの視点として役に立ちそうな情報を発信しつつ、一步一步進めていこうと考えています。

(大久保 慎二)

参考文献

- Nagano H, Kato S, Ohkubo S, Inubushi K (2012) Emissions of carbon dioxide, methane, and nitrous oxide from short- and long-term organic farming Andosols in central Japan. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*. 58(6), 793-801.
- Yvan C, Stephane S, Stephane C, Pierre B, Guy R, Hubert B (2012) Role of earthworms in regenerating soil structure after compaction in reduced tillage systems. *Soil Biology and Biochemistry*. 55, 93-103.
- 中元朋実 (1998) 耕地におけるバイオポアの機能：生物がつくる土壌孔隙の持続的作物生産への活用．日本作物学会紀事 67(4), 443-451.
- Turner J S (2000) *The Extended Organism (The Physiology of Animal-Built Structures)*. Harvard University Press. [『生物がつくる＜体外＞構造 延長された表現型の生理学』滋賀陽子 訳 深津武馬 監修 みすず書房 2007]
- 中村好男 (1998) 『ミミズと土と有機農業』．創森社．
- Gamble B (2011) Why chillies are hot. *Australian Geographic*. <http://www.australiangeographic.com.au/journal/why-chillies-are-hot-the-science-behind-the-heat.htm>
- Wurst S, Van der Putten W H (2007) Root herbivore identity matters in plant-mediated interactions between root and shoot herbivores. *Basic and Applied Ecology*. 8, 491-499.