

近畿大学奈良キャンパス、インドネシア・パダン市、および ガーナ・アデュギヤマ村の里山生態系における土壌動物相の 多様性の比較

多羅尾 一勤*・奥村 博司*・若月 利之*

*近畿大学大学院農学研究科環境管理学専攻

Comparative characterization of soil mesofauna diversity of the “satoyama” ecosystem on the Nara Campus, Kinki University, Japan, Padang, Sumatra, Indonesia, and Adugyama, Kumasi, Ghana

Kazunori TARAO*, Hiroshi OKUMURA*, and Toshiyuki WAKATUKI*

**Program in Environmental Management, Graduate School of Agriculture, Kinki University*

Synopsis

“Satoyama” is a Japanese word. “sato” means the habitat of village people, and “yama” means forested mountains. Therefore, satoyama is composed of watersheds, which includes forested mountain, upland farms, and lowland rice fields as well as irrigation canals and ponds. Satoyama watersheds have been subject to human development, management, and intervention. They are composed of various land use systems. Here we defined the Japanese satoyama as “temperate”, those in Indonesian as “super wet tropical”, and those in Ghana as “seasonally wet and dry tropical”. The differences among these ecological environments are big in terms of temperatures, hydrology, vegetation, and other natural characteristics. The objectives of this study were to compare the diversity of soil mesofauna in three satoyama systems in Japan, Sumatra, and Ghana. We collected 400 cc of topsoil includes litter layers for soil animal extraction using Tullgren equipment. The vertical depth was 0 to 4 cm, and in Japan and Indonesia we also took soil at 4 to 8 cm. Soil mesofauna act as decomposers of litter falls, so they are important for forest ecosystem to supply nutrients to the soils and plants as well as to form soil humus and structure.

The summary of our findings is as follows. Acari were the largest populations in all three countries, while population sizes of collembola varied. In Japan, collembolas were the second-largest group, while there were few collembolas in Ghana, where there were many Hemiptera. The greatest number of population of mesofauna was found in Indonesia, followed by Japan and finally Ghana. Regarding the numbers of soil mesofauna classes and orders, they were the highest in Indonesia, followed by Ghana and then Japan. We confirmed that the tropical zone was superior to the temperate zone with regard to biodiversity. The population composition ratio of soil mesofauna, except for Acari and Collembola, varied among the countries. For example, Coccoidea (order Hemiptera) were especially numerous in Indonesia and Ghana. The total population was negatively related with bulk density, that is, it was positively related with pore space and habitat space. This was the case in all three countries. However, there was no linear relationship between soil fertility (chemical characteristics) and soil bulk density (physical characteristics) and diversity of soil mesofauna.

Keywords: Satoyama land use, soil mesofauna, diversity and function, Nara, Japan, Padang, Sumatra, Kumasi, Ghana

背景および目的

近年、生態系に対する興味・関心が高まり、日本全体での自然や景観の保全に向けての活動が活発になされてきている。集水域は生態環境の基本単位であり、里山は人間が干渉し、管理し続けてきた森林、畑地、低地水田そして灌漑用の水路や溜池等を含む、地域ごとに多様な土地利用形態を有している一つの集水域として理解できる。里山生態系は、日本のみならず、熱帯アジアやアフリカにも存在し、地質や土壌、気温、降水量、湿度、日射量等が多様であり、多様な植生のもと、多様な土地利用と農業システムを形成している。インドネシアでは木材の供給源として利用される二次林から始まり、その麓では熱帯フルーツのドリアンやマンゴスチン、マンゴー、バナナなどのプランテーションが広がり、集落内には水田や畑が広がっている。アフリカのガーナでは、インドネシアと同じく二次林の麓に、プランテン（調理用バナナ）やメイズ（トウモロコシ）やキャッサバなどの栽培されている焼畑が広がり、さらにその後には水田や畑が作られている。

伝統的な日本の里山においては、特に奈良県では千年以上集中的によく管理されてきた。森林は木材や炭の生産にとって重要であった。しかし最近40年の間に、日本にある多くの里山は放棄され、その生産性は失われつつある。原因は近年の都市化や人口増加によるものだ。インドネシアの里山はいまだ維持されているが、近年の人口増や経済の拡大により、危機にある。ガーナには、維持されてきた里山というものは存在していない。開発によって失われた日本の里山は『修復』、近年の経済発展で失われつつあるインドネシアの里山は『保全』、維持されてきた里山が存在しないガーナは『創造』の必要性がある。里山生態系にはそこをすみかとする貴重な生物種がいる。彼らを人間の影響による絶滅から守るためには、その生態系の様相を知ることが第一歩となる。

本研究の目的は、この3ヶ国の里山的土地利用下にある土壌動物相の多様性を比較し、違いを明確にすることである。また、地上部において熱帯は温帯に比べ、生物相が多様であると言われている。それが地下部にも当てはまるのかどうかを検証する。

調査方法

抽出の際邪魔になる大きめの落葉を取り除いた落葉層を含む表層0～4cmを、400ccの分量でクビエナボックス或いはプラスチック製のボックスを用いてサンプリングし、Tullgren装置にかけ、72時間かけて中型土壌動物を抽出した。なお、日本・インドネシアにおいては4～8cmも採取した。そして抽出した土壌動物の個体数をデジタルマイクロスコープVHS-600（キーエンス）で計測し、綱・目・亜目レベルで同定を行った。土壌や物理性の比較については既出の論文等を参考にした。^{2,3,4,5,6)} 今回調査対象とした中型土壌動物は0.2～2mmの大きさのもので、ダニ目・トビムシ目・カニムシ目・ザトウムシ目・クモ目・カマアシムシ目・アザミウマ目・ハサミムシ目・ワラジムシ目・ヨコエビ目・カメムシ目・甲虫目・ムカデ綱・コムカデ綱・エダヒゲムシ綱・ヤスデ綱などがいる。ダニ目およびトビムシ目は亜目まで同定し、ダニ目はササラダニ亜目、トゲダニ亜目、その他に、トビムシ目はフシトビムシ亜目とマルトビムシ亜目に分類した。

土壌動物の存在は、森林生態系と密接な関係にある。まず、土壌動物が土壌に与える影響として、腐植形成がある。腐植形成は動物の排泄物の堆積と平行しており、これは土壌動物の存在が落葉の粉碎と微生物による腐植形成を促進するものだとされている。

次に、粒子組成の変化があげられる。ミミズ、アリ、シロアリ類は土壌中深くから土壌を地表にあげ、地表の土壌を地中深くまで運び耕耘、攪拌によって土壌の異なった粒子を混合、均一にする。

次に、孔隙の造成がある。土壌動物は土壌中にトンネルを掘り、これを維持、補強する。これに対するミミズ、セミ、コガネムシなどの大型の動物による役割は大きくミミズによるトンネルは牧草地で100～300本/m²にも及び、そのトンネルの占める量は土壌孔隙量の2/3にもなるといわれている。ミミズの中には2～3mの深さまでもぐることがあり、また、土壌中に残された根を食べることによっても、そこに孔隙を造成する。そして、孔隙の増加は、より深くまで酸素を供給するので動物、微生物の生活場所を増やし、植物の根の発達をも助ける。土壌動物による土壌の理化学

的性質の変化、改良は生育する植物には良い生育条件となるし、ミミズなど動物の遺体は施肥効果を発揮するので、植物の成長促進、収量の増加など、人間の目的とするものに結びついてくる。

Tullgren 装置はインドネシアやガーナにおいては無かったので、現地の人々、学生や大工の方々に協力してもらい、自作した。Plate.1、Plate.2 に写真を示す。(現地の人々に感謝の気持ちを込めて。)

ここで少しこの装置について説明しておく。この装置の原理は、「乾燥しているところから乾燥していないところへ移動する」という土壌動物の習慣を利用するというものである。ツルグレン装置の基本的構造は極めて簡単で、土壌や落ち葉を入れる篩の下に漏斗が取り付けられたものが本体である。漏斗の下には落下してきた土壌動物を受ける 200ml の容器が置かれる。本体の上方には電球があって、土壌や落葉を上方から照射する仕組みになっている。この装置は市販されているものの、自分で手作りできる便利な装置である。この装置に入れた土壌・落葉などの試料が電球か

らの熱放射によって徐々に乾燥してくると土壌動物は乾燥から逃れるため下へ下へと移動する。金網の少し上の部分でもっとも湿った場所にしばらく滞在するかもしれないが、やがてそこも乾燥してくると、耐え切れずに金網を通り抜け、漏斗を滑り落ち、受容器の中に落ち込んでくる。この装置の抽出時間は通常 72 時間とされている。

調査地の概要

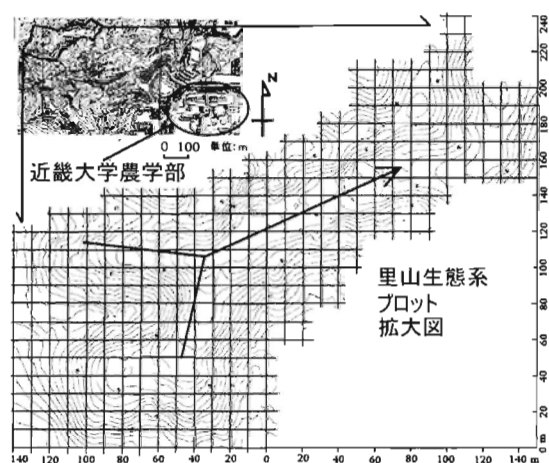


Fig. 1 : 日本調査地：近畿大学奈良キャンパス内里山林

Fig.1 は日本での調査を実施した近大里山内に設置した約 2.5ha のプロット図である。近畿大学奈良キャンパスが建てられている矢田丘陵一帯は、基盤の地質が花崗岩類からなり、花崗岩が至る所に露出しているとされている。矢田丘陵は断層構造を持っており、その西斜面は険しく、比較的なだらかな東斜面とは好対照な地形を示している。山間の棚田は放棄されてスギが植林されたが、あまり手入れされておらず荒廃している。プロット内はコナラを優占樹種とする二次林である。奈良県の年平均気温は約 14.9℃ で年平均降水量は約 1300mm。7 月の気温は約 25℃、8 月は約 26.5℃ ほどであった。プロット内の土壌は、斜面上部が乾性褐色森林土壌、斜面下部が湿性褐色森林土壌、谷部は灰色低地土壌（水田土壌）である。母岩は花崗岩である。拡大図の格子の幅は 10 m で矢印の線は谷部を表し、棚田跡が広がっている。谷部はスギが優占している。矢印の方向に向かって下方向の斜面が形成されている。データは同プロット内で中型土壌動物を調査した既存の修士論文の、熱帯と気温が似ている 7 月から 8 月のデータを用いた。²⁾



Plate1 : ガーナの Tullgren 装置



Plate2 : インドネシアの Tullgren 装置

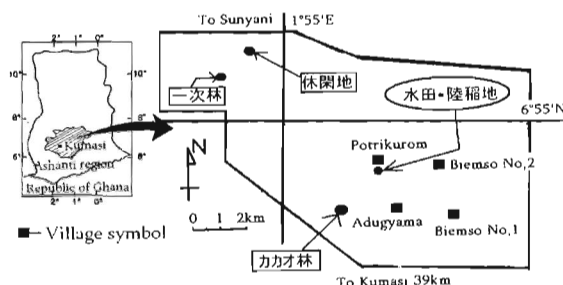


Fig. 2: ガーナ調査地：アシャンティ（Ashanti）州アデュギヤマ（Adugyama）村付近

Fig.2はガーナでの調査地を示している。調査期間は平成18年8月2日～平成18年10月1日（61日間）である。ガーナではアシャンティ州の州都クマシに存在するアデュギヤマ村付近にある一次林、耕作を中断している休閑地（現在ではアチャンボンと呼ばれる植生が発生している）、陸稲地、水田、カカオ林で調査を実施した。年間降水量は約1300mmほどで、季節は乾期と雨季に分かれる。雨季は4月から6月の前半が降水量の多い大雨季、8月下旬から11月中旬にかけての後半が小雨季とよばれ、7月と8月の間に雨の少ない小雨季がみられる。年平均気温は約25.2℃ほどである。各調査地の土壌は、一次林がFerric（フェリック（鉄質）層：鉄が分離した明るい斑紋層）Acrisols（アクリソル）、カカオ林と休閑地がFerric Lixisols（リキシソル）、水田・陸稲地がEutric（富養質）Gleysols（グライソル）である。

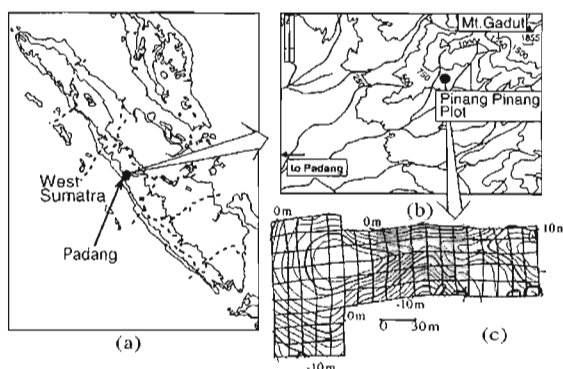


Fig. 3: インドネシア調査地ピナンピナンプロットバダン（Padang）州ガド山（Mt.Gadut）付近⁶⁾

Fig.3はインドネシアでの調査地である。平成19年7月23日～平成19年9月10日（50日間）にわたり、調査を行った。調査地は西スマトラにあるバダンという町から20kmほど東にあるガド山にある1haのピナンピナンプロットである。30年ほど前から様々な調査が行われているプロットであり、数多くの論文が発行されている。

年降水量は約5000mmほどである。年平均気温は約27℃ほど。土壌はandesite（火山岩）とlimestone（石灰岩）由来のTypic Dystropepts（塩基飽和度の低い酸性の土壌）である。

各々の調査地の略称を使用するときは、以下のような略称を使用する。インドネシア二次林0～4cmを“I①”、インドネシア二次林4～8cmを“I②”、ガーナは全て表層0～4cmなので、カカオ林を“GC”、陸稲地を“GT”、水田を“GS”、休閑地を“GF”、一次林を“GP”とする。近大里山は0～4cmを“N①”、4～8cmを“N②”とする。

結果

まず、Fig.4に、各調査地サンプリング層位ごとの総個体数及び綱・目数の合計を示した。まず各調査地ごとの総個体数を見てみると、インドネシアの0～4cmがもっとも多く、ついで日本の0～4cmが続く。ここで特徴的なのはガーナである。ガーナの個体数は落葉層を含む表層の土壌をサンプリングしたにも関わらず、個体数はインドネシアや日本のA層を含む4～8cmの個体数と同じ位の値を示した。陸稲地や水田地など、もともと落葉等が少ないところだけでなく、カカオ林や一次林など落葉層が存在する場所でも個体数が多くなかった。ガーナはインドネシアや日本に比べ、地表が著しく乾燥していた。乾燥を嫌う土壌動物は地下部へと逃げていたものと思われる。各調査地で確認された、綱・目数の値を見てみると、ガーナのカカオ林でもっとも多く22個、ついでインドネシアと続き、もっとも出現綱・目数が少なかったのは日本であった。ここでも注目していただきたいのはガーナである。ガーナは総個体数が少ないにも関わらず、出現した土壌動物の種類数が一番多い。この図から分かることは、ガーナという乾燥熱帯の特徴として、落葉落枝の有無に関わらず個体数が低いことと、インドネシアや日本に比べて少ない個体数の中に多くの種の土壌動物が生息しているということである。各調査地の個体数は、I①が52200/m²、I②が15200/m²、GCが12750/m²、GTが12350/m²、GSが8225/m²、GFが17465/m²、GPが19500/m²、N①が44700/m²、N②が15800/m²であった。

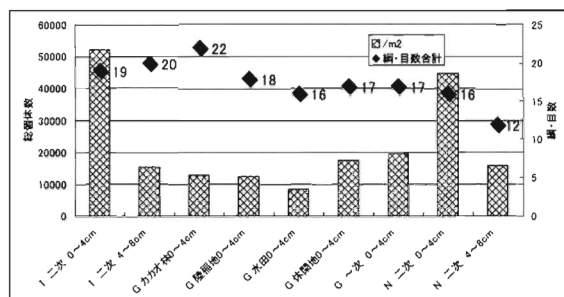


Fig. 4: 総個体数および目数

Table.1 に国毎に全ての調査地で出現した土壌動物綱・目の名称と出現数を示した。ダニ目、トビムシ目はどの国でも共通して出現している。カメムシ目は近大里山では見られず、反対に湿潤熱帯であるインドネシア、乾燥熱帯であるガーナにも出現している。逆にヨコエビ目は、日本の近大里山のみで見られた。この表から国毎で出現する土壌動物に違いが見られることが分かる。尚、ここで示してある綱・目数のデータであるが、この表ではインドネシアがもっとも高いということになっている。これは全ての調査地から出現した綱・目数を示してあるためである。

Fig.5 - I に総個体数に占める綱・目別個体数割合を示した。これをみるとどの調査地でもダニ目がもっとも多く個体数を占め、それぞれ、I ①

Table. 1: 出現した綱・目名と出現数

出現した土壌動物綱・目	インドネシア里山	ガーナ里山	日本近大里山
Coleoptera<Adult> コウチュウ目<成虫>	○	○	○
Coleoptera<Larvae> コウチュウ目<幼虫>	○	○	○
Acari ダニ目	○	○	○
Collembola トビムシ目	○	○	○
Thysanoptera アザミウマ目(総翅目)	○	○	○
Pseudoscorpions カニムシ目	○	○	○
Hemiptera カメムシ目(半翅目)	○	○	×
Hymenoptera ハチ目	○	○	○
Isoptera シロアリ目(等翅目)	○	○	○
Symphyla コムカデ綱	○	○	○
Chilopoda ムカデ綱(唇脚綱)	○	○	○
Diplura コムシ目	○	○	○
Dermaptera ハサミムシ目	○	○	×
Protura カマアシムシ目	○	○	○
Araneae クモ目	○	○	○
Opiliones ザトウムシ目	○	○	×
Schizomida ヤイトムシ目	○	○	×
Diptera<Larvae> ハエ目(双翅目)幼虫	○	○	○
Diplopoda ヤスデ綱(倍脚綱)	○	○	○
Isopoda フラジムシ目(等脚目)	○	○	○
Orthoptera バッタ目(直翅目)	○	○	×
Amphipoda ヨコエビ目	×	×	○
Lepidoptera<Larvae> チョウ目(鱗翅目)<幼虫>	○	×	×
エダヒゲムシ綱	○	○	×
イトミミズ目 Tubificida ヒメミミズ科 Enchytraeidae	○	○	×
綱・目数計(※甲虫目成虫と幼虫区別せず)	23	22	16

が 59.2% (30902/m²)、I ② が 52.5% (7980/m²)、GC が 53.3% (6796/m²)、GT が 55.9% (6904/m²)、GS が 42.6% (3503/m²)、GF が 40.1% (7003/m²)、GP が 53.8% (10491/m²)、N ① が 65.5% (29279/

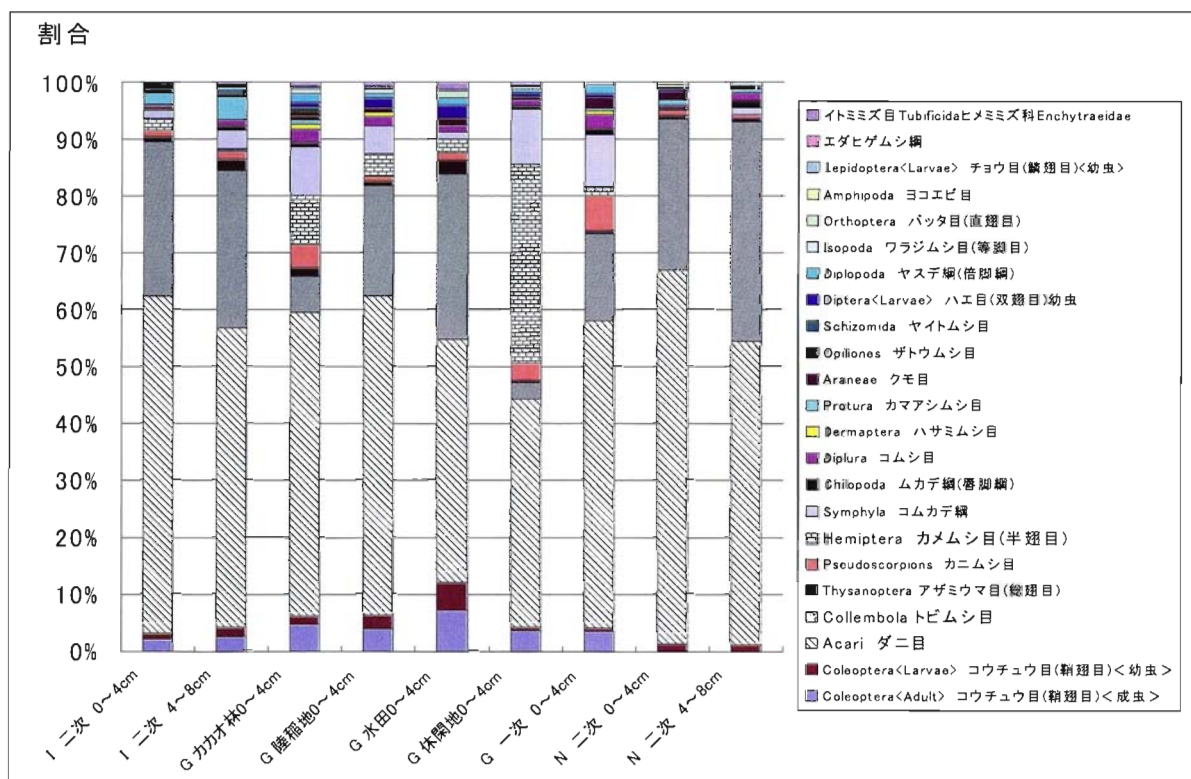


Fig. 5 - I: 総個体数に占める土壌動物の個体数割合

m²)、N②が53.2% (8406/m²) であった。ガーナのカカオ林や休閒地を除き、ほかの調査地ではダニ目についてトビムシ目が多く個体数を占めていた。GCやGFではトビムシの個体数割合はそれぞれ6.3% (803/m²)、2.9% (506/m²) と非常に少なかった。GCやGFでは、カメムシ目がダニ目について多く、それぞれ8.6% (1097/m²)、34.9% (6095/m²) であった。

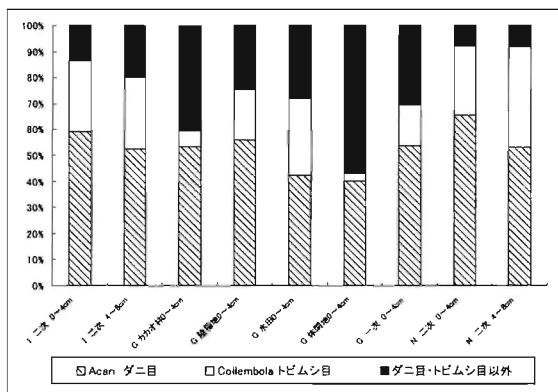


Fig. 5-II: ダニ目・トビムシ目が総個体数に占める割合

Fig5-IIはFig5-Iをダニ目・トビムシ目以外のものを一つにまとめて視覚的に見やすくしたものである。ダニ目とトビムシ目が個体数の多くを占めていることがわかると思う。Fig6にインドネシアとガーナのダニ目個体数中の亜目別個体数割合を示した。どの調査地でもササラダニ亜目がかつてもっとも多く、ついでトゲダニ亜目が多かった。コナダニ亜目やケダニ亜目は全ての調査地であまり出現しなかった。この個体数構成は近大里山を始め、日本の生態系と共通している。例えば近大奈良キャンパス内の同プロット内で調査した(山口2007)のデータでは、捕食者にあたるトゲダニ亜目・ケダニ亜目・コナダニ亜目などの合計はO層で9%~14%、A層で13%~14%と少ない。8) なお、図には示していないが、トビムシ目の

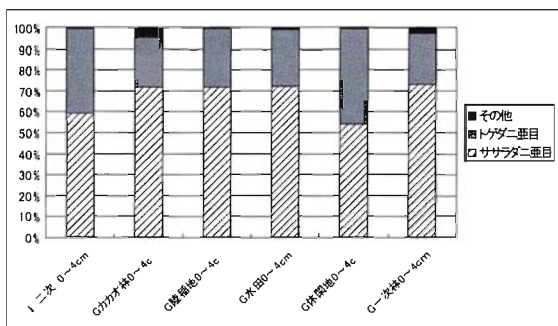


Fig. 6: ダニ亜目構成割合

亜目構成はフシトビムシ亜目がほとんど90%以上を占めており、マルトビムシ亜目はあまり出現しなかった。これは日本の近大里山においても共通している。

次にダニ・トビムシ以外の土壌動物に着目し、それらの間でどの土壌動物が個体数を占めているのかを示したのがFig.7である。コムカデ綱はガーナ水田を除き、ほかの調査地全てで多く出現していた。カマアシムシ目はインドネシアで多く出現し、ついで日本においても多く出現していた。カメムシ目はガーナで顕著に多く、特にカカオ林や休閒地ではトビムシ目よりも多く出現していた。カメムシ目のなかでもカイガラムシ上科が個体数の多くを占めていた。Plate.3とPlate.4に写真を示す。腹面の写真においてカメムシ目カイガラムシ上科と同定した。Fig.7からは国ごとで出現する目の個体数構成に異なる特色があることが分かる。コムカデ綱は落葉や倒木、石の下などに生息し、腐りかけた落葉、菌類、バクテリアを食べる。カマアシムシ目は、植物の根に生える菌糸の内容物を吸う様子が観察されており、これを餌としているものと考えられる。¹⁾



Plate. 3: カメムシ目カイガラムシ上科 (背面)



Plate. 4: カメムシ目カイガラムシ上科 (腹面)

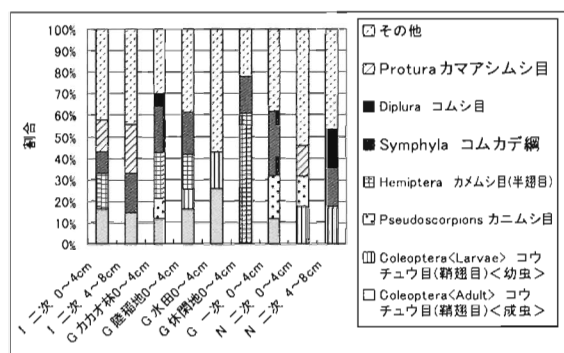


Fig. 7: ダニ・トビムシ以外の土壌動物の個体数別割合

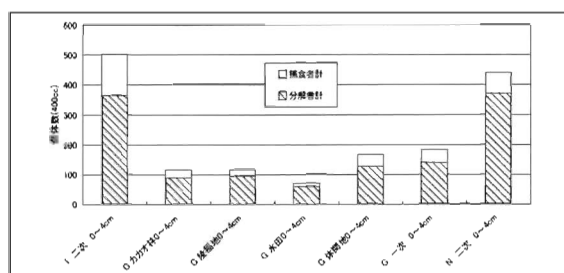


Fig. 8: 分解者と捕食者別の総個体数 (実測値、甲虫目成虫・幼虫を除き、ダニ目・トビムシを含む)

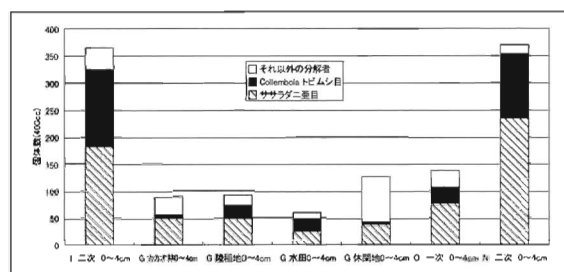


Fig. 9: 分解者の内訳 (実測値)

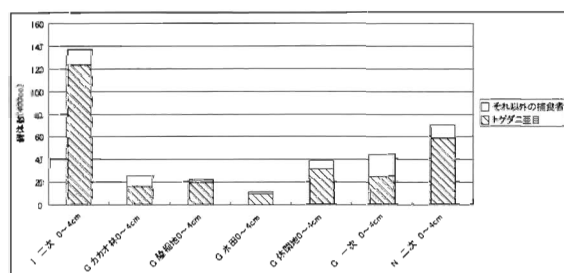


Fig. 10: 捕食者の内訳 (実測値)

Fig.8はFig.4の総個体数のデータを分解者と捕食者に分けて集計しなおしたグラフである。比較しやすいように表層0～4cmのみ示してある。ただし、甲虫目は食性が多様で、虫食、腐肉食、糞食、葉食、樹木食、樹液食、菌食、蜜食などがあるため、完全に区別することは難しいので、成

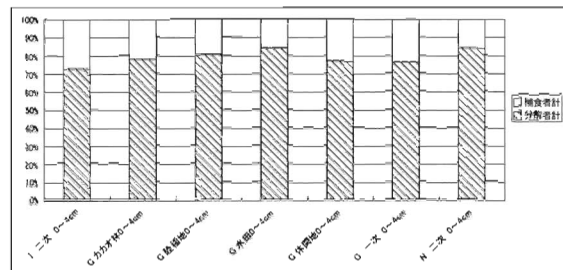


Fig. 11: 分解者と捕食者別の総個体数 (割合、甲虫目成虫・幼虫を除き、ダニ目・トビムシを含む)

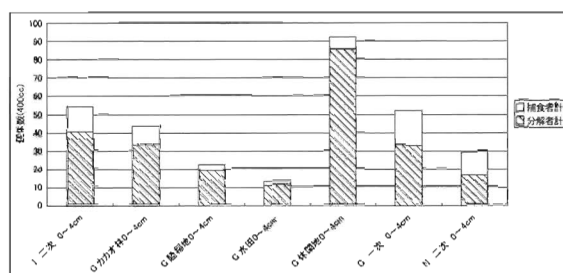


Fig. 12: 分解者と捕食者別の個体数 (実測値、甲虫目成虫・幼虫、ダニ目・トビムシを含まない)

虫、幼虫ともに除外した。またダニ目はFig.6にみられるように、分解者のササラダニ亜目と捕食者のトゲダニ亜目で個体数のほとんどを占めるため、このふたつに区別し、ケダニ亜目やコナダニ亜目は個体数が極少ないため、除外した。よって分解者は、ダニ目の中のササラダニ亜目、トビムシ目、アザミウマ目、カメムシ目、コムカデ綱、カマアシムシ目、コムシ目、ハエ目幼虫、ヤスデ綱、ワラジムシ目、バッタ目、ヨコエビ目、チョウ目幼虫、エダヒゲムシ綱、イトミミズ目の15種、捕食者は、ダニ目のトゲダニ亜目、カニムシ目、ハサミムシ目、ムカデ綱、クモ目、ザトウムシ目、ヤイトムシ目の7種に区別した。これを見ると、どの調査地でも、分解者のほうが個体数の多くを占めていることがわかる。Fig.9はFig.8で集計された分解者の個体数内訳である。これを見ると、休耕地を除く調査地でササラダニ亜目とトビムシ目で多くの個体数を占めていることがわかる。休耕地で多くの個体数を占めていたのはカメムシ目であった。Fig.10はFig.8で集計された捕食者の個体数内訳である。これを見ると、全ての調査地でトゲダニ亜目が個体数の多くを占めていることがわかる。Fig.11はFig.8のグラフを割合で示したグラフである。これを見るとどの調査地間でも同じような割合で分解者が大半を占めてい

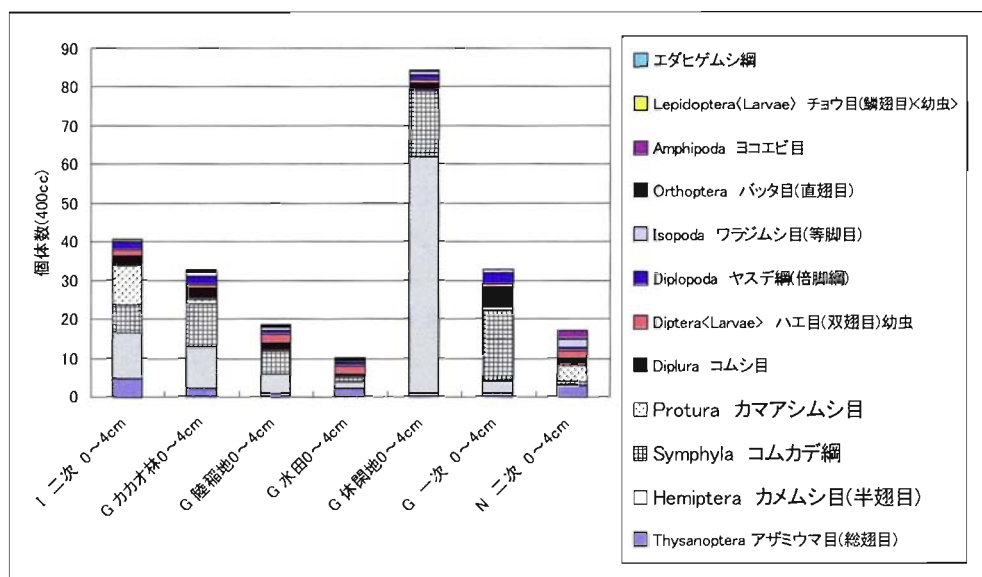


Fig. 13: ササラダニ亜目・トビムシ目以外の分解者の内訳

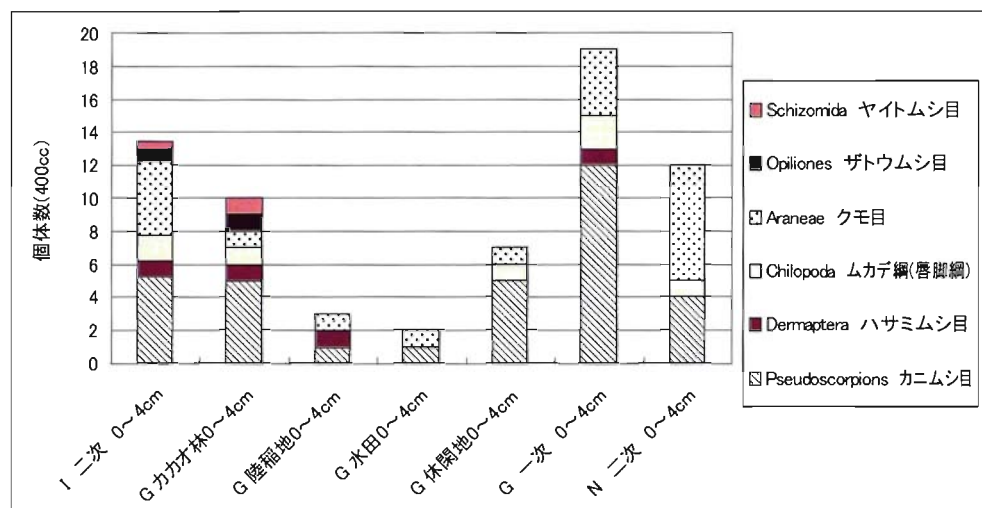


Fig. 14: トゲダニ亜目以外の捕食者の内訳

ることが示されている。Fig.12は甲虫目成虫・幼虫、ダニ目とトビムシ目を除いて集計した、分解者と捕食者別の個体数である。これをみると、分解者が個体数の多くを占めることは変わらないことがわかる。休閑地で他の場所に比べて分解者の数が大きくなっているのは、カメムシ目の影響である。Fig.13はFig.12で集計された分解者の個体数内訳である。これをみると、近大里山ではカマアシムシが多く、ガーナの調査地ではコムカデ綱やカメムシが多く、インドネシアの調査地ではコムカデ綱やカメムシ目、カマアシムシが多いことがわかる。Fig.14はFig.12で集計された捕食者の個体数内訳である。これをみると、近大里山ではクモ目が一番多く、ついでカニムシ目

が多い。ガーナやインドネシアではこの逆でカニムシ目が一番多く、クモ目がついで多いことがわかる。Fig.15はFig.12を割合で示したものである。これをみるとダニ目やトビムシ目を含めたFig.8と同じように分解者が割合の多くを占めていることがわかる。

Table.2は比較に用いた化学性及び物理性のデータを綱・目数と総個体数とともに示したものである。綱・目数は甲虫目の成虫と幼虫を区別し、ハチ目アリ科とシロアリ目を除いたものである。総個体数ではハチ目アリ科とシロアリ目の個体数を除いたものである。これをもとにFig.16を作成した。サンプル層位の数値が違うのは、比較に用いた論文のデータの層位を示しているた

Table. 2

	網・目数	総個体数 千/m ²	TC g/Kg	TN g/Kg	容積重 Mg/m ³	C/N	Shannonの多様性指数
I 二次 0～5cm	18	52.075	62.00	4.7	0.26	12.00	1.21
I 二次 5～10cm	19	15.15	33.00	3.3	0.79	11.60	1.35
G カカオ林 0～20cm	21	12.75	32.4	3.3	1.13	9.7	1.61
G 陸稲地 0～20cm	16	12.35	17.9	2	1.46	9.0	1.36
G 休閑地 0～20cm	16	17.465	24.4	2.4	1.39	10.0	1.45
G 一次 0～20cm	17	19.5	43.0	5	1.26	8.6	1.53
N 二次 0～10cm	16	30.25	34.60	2.3	0.53	16.24	1.05

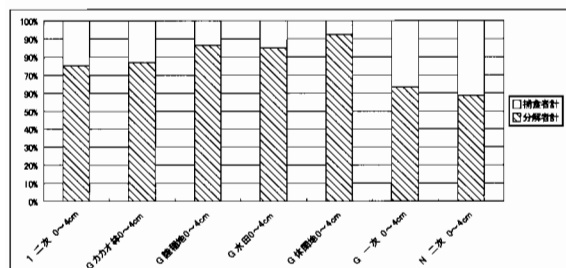


Fig. 15：分解者と捕食者別の総個体数（割合、甲虫目成虫・幼虫、ダニ目・トビムシ目を含まない）

めである。また、ガーナでは水田のデータが無く、近大里山のデータが0～10cmのものしか無かったため、網・目数のデータは0～4cm層、4～8cm層のうちどちらかでしか出現していないものも含めた合計値を、総個体数のデータは0～4cmと4～8cm層のデータを合計し、平均したものをを用いた。Fig.16にはC/N比（化学性）や容積重（物理性）と総個体数、出現した土壌動物の網・目数との関係が示されている。これを見ると、容積重が高い程個体数が少なくなることが分かる。さらに、容積重が高くなるとC/N比が低くなっていることも分かる。C/N比の減少の原因はTCが減ることによる。しかし、出現した土壌動物の網・目数と総個体数や容積重やC/N比との関係は明らかではなかった。このことから、土壌動物の多様性を決める要因はデータに表れていない化学性や物理性あるいはそれ以外にあると思われる。

Table.3は、Shannonの多様性指数をそれぞれの調査地で求めたものである。この値が高いほど、多様性が高い、すなわち、多くの土壌動物種が種々の個体数を均等にして存在していることを示している。この表をみると、ガーナがもっとも多様性が高いことが示されている。これは個体数が少ないにも関わらず、出現した土壌動物の網・目数が多かったことによる。もっとも多様性が低かったのは日本であった。なおこの表内での網・

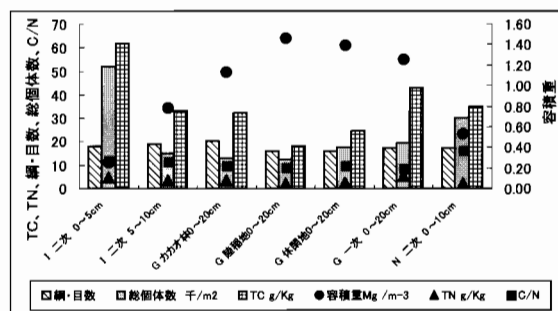


Fig. 16：網・目数、総個体数と化学性および物理性の関係

目数のデータは、甲虫目の成虫と幼虫を区別し、ハチ目アリ科とシロアリ目を除いたものである。通常アリ科やシロアリ目はコロニー（巣）単位で計測するためである。個体数が多いにも関わらず、多様性が低かった近大里山は特定の土壌動物が優占して存在していることを示している。

Table. 3：Shannonの多様性指数

Shannonの多様性指数			
地点	個体数	種数	Shannon
I 二次 0～4cm	522	18	1.21
I 二次 4～8cm	152	19	1.35
G カカオ林 0～4cm	128	21	1.61
G 陸稲地 0～4cm	124	17	1.36
G 水田 0～4cm	83	15	1.46
G 休閑地 0～4cm	175	16	1.45
G 一次 0～4cm	195	16	1.53
N 二次 0～4cm	447	15	0.93
N 二次 4～8cm	158	11	1.05

以上の結果をまとめると、乾燥熱帯、湿潤熱帯ともに、熱帯の方が温帯に比べて、多様性が高いことが示され、ササラダニ亜目が3ヶ国内で共通して個体数で優占しており、国毎に、ダニ目・トビムシ目以外で出現する土壌動物に違いが見られ、どの国でも総個体数に占める分解者の比率は捕食者を上回っており、どの国でも容積重と土壌動物の個体数は反比例の関係にあり、土壌動物の多様性と物理性（容積重）や化学性（C/N比）

Table 5: 熱帯林、亜熱帯林および温帯落葉林における1平方メートルあたりの大型土壌動物の存在量と量

	熱帯多雨林		熱帯落葉林	亜熱帯多雨林	温帯落葉林
	サラワク	パソ	タイ	西表島	東北
シロアリ	1125(1.78)	3485(9.41)	100(0.09)	58(0.12)	0
ミミズ	26(0.65)	25(0.18)	10(0.38)	61(7.48)	68(17.75)
アリ	457(0.47)	1624(0.82)	200(9.17)	142(0.17)	346(5.45)
その他	280(1.36)	253(2.07)		251(4.49)	
合計	1888(4.26)	5387(12.48)	310(9.64)	512(12.26)	432(23.20)

注：数字は存在個体数（湿重量：グラム）

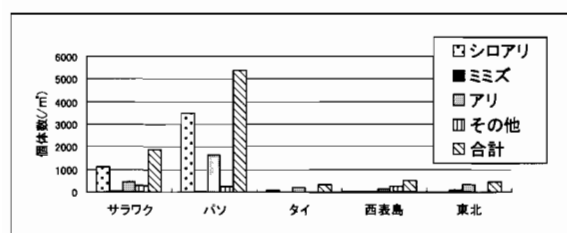


Fig. 18: 大型土壌動物存在個体数 (Table5より多羅尾が作成)

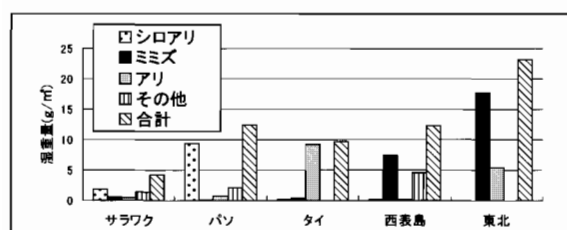


Fig. 19: 大型土壌動物湿重量 (Table5より多羅尾が作成)

ここでは大きく分解者として定義した。熱帯においてはシロアリ目の貢献するところが非常に大きいことが分かる。長期的に見た、土壌改変者としての機能はミミズの方が大きい。シロアリは大きなアリ塚を形成するが、一度作ってしまえば、何年間はそのまま維持される。ミミズの糞塊のように土壌として供給されるのは、何十年も風雨にさらされた後である。アリ塚は非常に頑丈に作られており、人間が壊そうと思えば、ツルハシなどで力の限り打ち付けなければ壊れない。また、アリ塚は表面だけが大きいだけでなく地下部にも大きなアリの巣状に巣穴が形成されている。このように土壌改変のサイクルは非常に遅いものの、土壌に与えるインパクトはミミズのとはまた異なると思われる。熱帯での土壌動物の個体数が少ないのも、シロアリのコロニー形成による土壌中の孔隙の優占による影響があるのかもしれない。

Table.6 はミミズとシロアリのもたらす影響の違いを整理した表である。シロアリ塚の存続期間

Table. 6: 分解者の違いがもたらす影響 (表)

	熱帯【容積重(高)】	温帯【容積重(低)】
○優占する分解者	シロアリ	ミミズ
○大きさと数	小型・多数	大型・少数
○土壌攪拌の特徴	地表に大きな塚を作る(塚に栄養分を固定する)	地表に糞塊を排出・地中にトンネル(糞塊やトンネル内に栄養分を固定する)
○規模	局所的	全体的
○構造の強度	強固(数年)	脆弱(糞塊は雨で容易に壊れる)
○他の土壌動物に及ぼす影響	孔隙率や大きさの維持、栄養分の固定によって、他空間からの異種進入を困難にする【静的多様性の維持】(変動幅が小さい)	孔隙率や大きさの変化による土壌の攪乱で環境負荷の増加。変化に弱い種の自然淘汰。孔隙同士をつながりが多様なことや、栄養分が一樣に分布するため、異種進入を容易にする【動的多様性の維持】(変動幅が大きい)

はまだ明らかになっていないが、北オーストラリアのテングシロアリの1種(N.triodiae)の大型の塚では100年以上と推定されている。コロニーが死滅してから塚が消滅するまでの時間は、巣の構造や材料によって大きく異なるが、オーストラリアの小型の塚(Tumulitermes hastilis)で3年、中型の塚(Amitermes vitiensis)で30年と推定されている。塚を作るシロアリによる地表面への土の年堆積速度は、0.013mm(北オーストラリア)から0.13mm(ウガンダ)である。

アフリカのセネガルのサバンナでは1ha内に0.5個のエントツオオキノコシロアリの塚があり、そこでは1800kg/ha・年の土が地表に運び上げられ、そのうち800kgが蟻道を作るのに使われている。シロアリは土に唾液や糞をまぜて塚や蟻道を作るので、それらに含まれる有機物は素材の土よりは増える。しかし、素材の土を地下の深いところから運ぶこともあるので(とくにオオキノコシロアリ)、塚や蟻道の中の有機物はまわりの表層土よりも低いこともある。カルシウム・カリウム・可変カチオンはシロアリが加工した土のほうがまわりの土よりも多い。¹⁴⁾

また、シロアリ塚の密度は、シロアリの種によってその大きさが異なるためまちまちであるが、例としてマレーシア・パソーのジャングルで、スミキノコシロアリは地表に直径二メートルにもなる大きな蟻塚をつくるが、この蟻塚が1ヘク

タールあたり 20～50 もある。¹⁵⁾

ミミズのバイオマスも場所によって様々であるが、タイ東北部の畑地には 30～50cm のフトミミズが生息し、その排糞量は 1 日に約 300～400g の糞塔 (Tower casts) を土壌表面に形成する。生息数は個体の大きさや土壌の立地利用環境によって異なるが 1m² あたり 100 個体以上生息するところもある。ミミズは植物遺体や土砂を摂食する雑食性であるところから、表層に排出される大量の糞土 (Casts) は固結団粒化しており表土流出を抑制していると推察できる。土中の徘徊移動は菌根菌や有用微生物の伝播促進にもかかわり、土壌環境の維持と肥沃化に寄与する効果も期待される。¹⁶⁾ 日本の京都府北桑田群美山町にある京都大学芦生演習林の調査でフトミミズの一種クソミミズ (*Pheretima hupeiensis*) の 1 年間の糞塊生成量を調査した結果では、活動期間は 4 月中旬から 10 月中旬であるが、この期間に地表に排出された糞塊は 1 平方メートルあたり、2.3～6.1kg、平均 3.8kg、1 ヘクタールあたり 38 トンもの量になった。クソミミズが土の中から、これだけの量の土を糞塊として、地表に運び出した、つまり土を耕したということになる。そして地表に排出された土壌をならすと、3.1mm の新しい土の層をつくったことになる。¹⁷⁾ またミミズの糞塊は雨で容易に崩れてしまうことがわかっている。糞塊として維持される期間は短く、すぐに土壌へと供給されるようである。

以上のことにより、長期的にはミミズは全体的に、シロアリは局所的に土壌構造や養分環境を変化させることがわかる。

Fig.20 は Table.6 を図解で示したものである。養分を固定している様子が視覚的に理解できるかと思う。Table.7 はミミズとシロアリがもたら

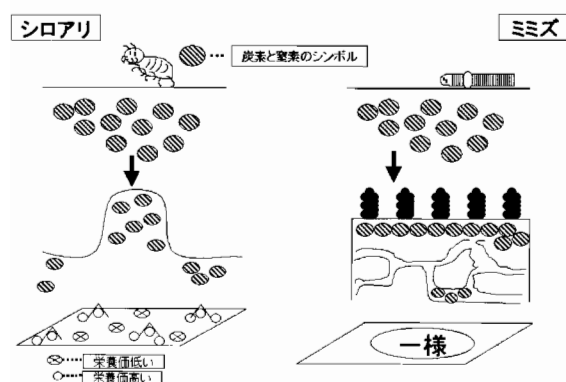


Fig. 20: 分解者の違いがもたらす影響 (概念図)

した土壌への影響を化学性を見ることで比較したものである。¹¹⁾ EC (電気伝導度) は土壌溶液中のイオン総量を表す指針として扱われる。単位 uS/cm (マイクロジーメンス/センチメートル) である。微生物の単位 cfu/g の cfu は Colony Forming Unit の略称で菌量の単位である。例えば 20cfu/g あるいは 20cfu/ml とは、1g または 1ml 中に菌が 20 個存在することを示している。B/F 値は (細菌数/糸状菌数) である。水田の土壌についてはこの B/F 値と土壌環境との間に密接な関係が認められている¹³⁾。このデータを見ると、森林地のデータでミミズは土壌の養分を集める能力があることが示されている (土壌養分固定能力と呼ぶ)。しかしシロアリではそのような値は示されていない。このことからシロアリにはミミズのような土壌養分固定能力がないと思われるかもしれないが、Fig.21 にシロアリに関するもうひとつのデータを示した。¹²⁾ これは森林 (forest)、ブッシュ (bush)、裸地 (bare) のシロアリ塚、シロアリ塚付近の土壌 (塚から 2～3m まで)、周囲の土壌 (塚から 2～3m 以上離れた土壌) の炭素 (C) と窒素 (N) 量を比較したグラフである。森林やブッシュのような比較的肥沃な場所では相対的にシロアリ塚や塚付近の土壌の方が養分量は低くなるが、裸地のような肥沃でない場所ではシロアリ塚や塚付近の方が養分が高いことがわかる。このことにより、ミミズや、ミミズには劣るがシロアリにも養分固定能力

Table. 7: ミミズとシロアリの塚造成が及ぼす影響

塚造成が土壌の化学性に及ぼす影響			
	EC uS/cm	pH (H ₂ O)	C%
ミミズ糞塚(フトミミズ)	134a	6.2a	3.65a
ミミズ周辺	33b	4.3b	0.89b
シロアリ塚(オオキノコシロアリ)	25c	4.5b	0.53c
シロアリ周辺	30bc	4.2b	0.79bc
paired analysis	*	**	*

※ベトナム・ホーチミン北部のクチ・トンネル地区森林 (土肥要旨集 第 50 集 (2004) Part II シロアリとミミズが造成する塚土壌 河口定生 他)

塚造成が土壌の微生物相に及ぼす影響			
	Bacteria × 10 ⁶ cfu/g	Fungi × 10 ⁴ cfu/g	B/F
ミミズ糞塚(フトミミズ)	153a	36a	440a
ミミズ周辺	44b	33b	139b
シロアリ塚(オオキノコシロアリ)	6d	5b	129b
シロアリ周辺	20c	40a	54c
paired analysis	*	**	**

※ベトナム・ホーチミン北部のクチ・トンネル地区森林 (土肥要旨集 第 50 集 (2004) Part II シロアリとミミズが造成する塚土壌 河口定生 他)

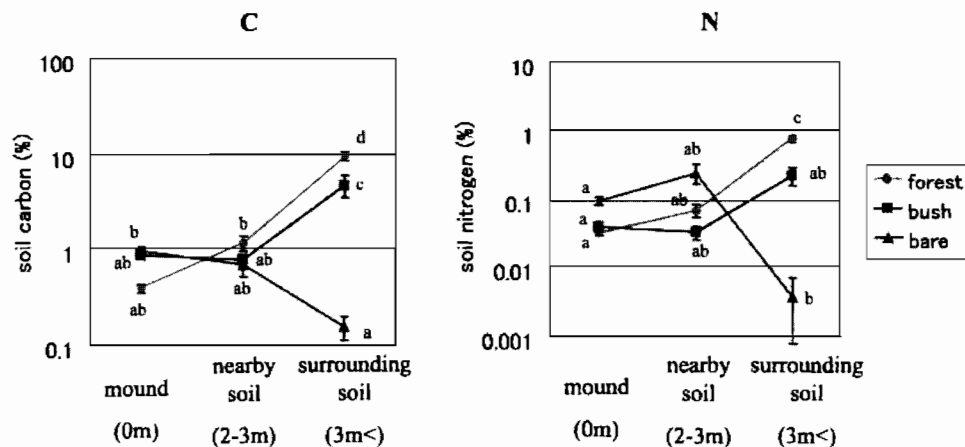


Fig. 21 : シロアリ塚からの距離および土地利用による土壌炭素・窒素の変動

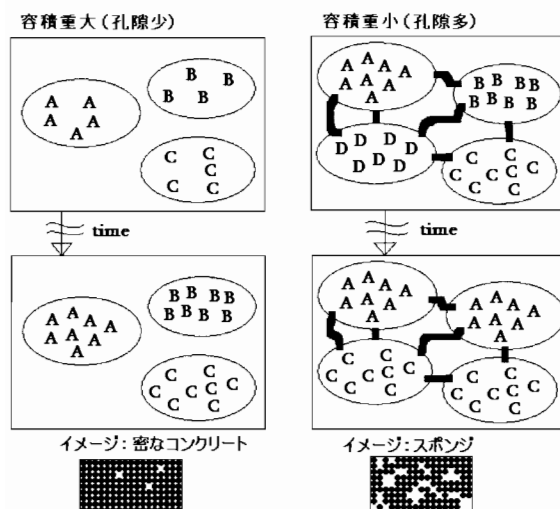


Fig. 22 : 容積重による多様性の変化の概念図

があり、シロアリは長期にわたって局所的に養分を保持する役割を担っていることがわかる。ミミズが優占する場所では、養分が一樣に分布され、広い範囲で動植物が進入しやすくなり、それに伴い、土壌動物も変化する。しかしシロアリが優占する場所では、シロアリ塚が局所的に養分を固定することで、養分量が不均一になり、動植物の進入を困難にする。そのことで土壌構造は変化しにくく、土壌動物相も変化しにくくなると考えられる。つまり、ミミズが優占する場所では、容積重が小さくなり、シロアリが優占する場所では、容積重が大きくなる、ということになる。Table.6に書いた他の土壌動物に及ぼす影響というのは、容積重の維持によるものである。それを図解したのが、Fig.22である。容積重が大きいとき、すなわち、孔隙が少なく、土壌が密に詰まっているときは、それぞれの孔隙は孤立して存在していて、

孔隙から孔隙へのアクセスが困難である。このとき、時間経過による種組成の変化は起こりにくいと考えられる。環境の変化、捕食圧による負荷がかかりにくく、環境の変化に弱い種も存在でき、多様性は維持される。また、土壌が密に詰まっているため、構造が強く、孔隙の量や大きさの変化による生活『空間』の消失が少なく、イメージとしてはコンクリートのような構造と考えられる。ゆえに、孔隙が新たに作られにくいので総個体数は増えにくい。次に、容積重が小さいとき、すなわち、孔隙が多いとき、土壌が疎に詰まっているときは孔隙同士が3次元で孔隙同士がつながっていて、孔隙から孔隙へのアクセスが容易であると考えられる。このとき、時間経過による種組成の変化が起こりやすいと考えられる。環境の変化、捕食圧による負荷が大きくなり、環境の変化に弱い種は淘汰され、多様性は減少する。また、土壌が疎に詰まっているため、構造がもろく、少しの物理的变化で孔隙の量や大きさの変化が起こりやすく、イメージとしては手で握れば簡単に構造が潰れてしまうスポンジのような構造と考えられる。新たな孔隙が作られやすいことで総個体数は増え、孔隙間のつながりによって他空間からの異種が進入しやすくなることで多様性は維持される。以上のような機構が土壌中には存在すると考えられる。

最後に Plate.5 に各国で採取された同じ目、あるいは亜目に属する土壌動物の写真を掲載した。これを見ると3ヶ国間で非常によく似た形質を有している土壌動物が出現していることが分かる。環境の違いは地表部においては、顕著に表れる。熱帯の高木、多様な昆虫類、奇抜な色の爬虫類な

ど、温帯と比較して、すぐにわかる違いが現れてくるのに対し、土壤動物においては、見た目上同じような、形質を有しているように見える土壤動物がほとんどの個体数を占める。詳しいデータがないので推測の域を出ないが、地表部は場所間のアクセスがしやすく、空間の隔たりが少ないので、生物同士の交流が盛んに行われる、そのことにより、被食-捕食の関係が発達し、被食者は食べられないように進化をするし、捕食者はより効率的に獲物を得られるように進化する。その代表的なものが擬態や警告色であり、熱帯に見られるような奇抜な色のカエルなどが現れるのである。それとは逆に、土壤動物の住処である地下部は土壤により隔離され、光の届かない暗所である。土壤の種類によっては、団粒構造が発達し、孔隙の大きい場所や小さい場所といった空間の大きさの多様性はあるものの、土壤粒子による他空間へのアクセスが制御されることにより、地表部のような異種間の交流が起こりにくいのではないだろうか。また、土壤動物は局所的に個体数が偏って分布していると言われている。¹⁰⁾ 他空間へのアクセスがしづらいためである。その様な環境では、繁殖様式の変化等は起こりにくい。トビムシは昆虫の祖先と言われている原始的なグループであるが、彼らの繁殖様式はオスが精胞と呼ばれている袋状の入れ物に精子を取り込んだものを、通りかかったメスがこれを自分の生殖器に取り込んで受精する。しかしこれは体外受精を陸上に応用しただけの完成度の低いシステムで、いかにも効率が悪い。トビムシがいまだにこんな非効率な方法をとっていてもやっていけるのは、狭いスペースに多くの個体が密集して暮らしているからと考えられている。⁹⁾ 繁殖様式を変化させる必要性がないのである。そのため、進化が起こりにくく、国間で同じような形質を持つ土壤動物が現れているのではないかと考えられる。

要 約

落葉層を含む表層を0～4cm、4～8cm(4～8cmは日本、インドネシアのみ)400ccサンプリングし、ツルグレン装置にかけて中型土壤動物を抽出し、個体数を計測し、綱・目・亜目レベルで同定を行った。結果の概要は以下のとおりである。3カ国ともに、どの調査地においても、ダニ

目がもっとも多くの個体数を占めた。総個体数はインドネシア>日本>ガーナの順で多く、綱・目数を比較すると、インドネシア>ガーナ>日本と続く。熱帯の方が温帯よりも多様性の面で勝ることが分かった。乾燥熱帯であるガーナも総個体数ではもっとも少ないにも関わらず、四季の季節変化があり、多様な環境を持つ日本よりも多様性が高いのは、乾燥や湿潤以外にも多様性を決定する要因があるものと考えられる。そして、国毎で、ダニ目、トビムシ目以外で出現する土壤動物種の個体数構成に違いが見られた。

容積重と総個体数は反比例の関係にある。容積重すなわち土壤の密度が大きい程、土壤動物の生息場所である土壤中の孔隙が少なくなるためである。これは3カ国とも同様であった。著しく乾燥する熱帯であるガーナで土壤動物の個体数が少ないのは乾燥による地下部への忌避行動や、シロアリ目による土壤中内のコロニー形成による土壤空間の占拠や団粒の破壊の影響であると思われる。容積重が多様性に大きな影響を与えるとすれば、孔隙間のアクセスのしやすさや、土壤構造の強度によって、多様性が増減する可能性があり、総合的な個体数の少なさが、特定の種の優占を制御することにより、多様性が維持されている可能性もある。

3ヶ国間において外見の形質が似たような土壤動物種が出現するのは、地上部とは異なり、暗所かつ土壤団粒による他空間へのアクセス制限からくる進化の制限つまり、遺伝子交流の無さにあると思われる。

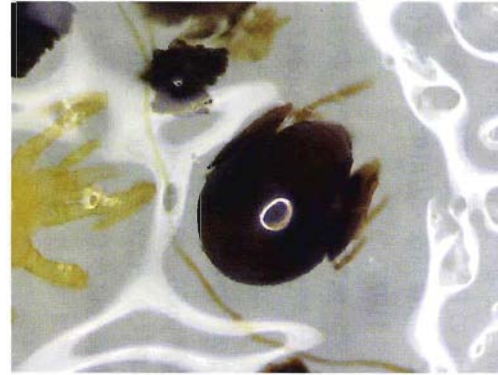
謝 辞

最後に、この研究に対して、様々な方のご協力があった。研究室の後輩、先輩方、奥村博司准教授、若月利之教授、ガーナの土壤研究所のMr.Annan, Mr.Buri,はじめとする皆様、インドネシアではアンダラス大学のMr.Hermansah, Mr.Azwarはじめとする皆様には大変お世話になり多くのご助力を賜った。ここに感謝の意を申し上げる。また、本研究は若月利之、近畿大学農学部、をリーダーとする科研基盤S「西アフリカの食料増産と劣化環境修復のための集水域生態工学」及び特別推進研究「水田エコテクノロジーによる西アフリカの緑の革命実現とアフリカ型里山

集水域の創造」による支援を受けた。

引用文献

- 1) 節足動物の多様性と系統 石川良輔 編 裳華房 2008 年, 286pp-288pp, 331pp-332pp
- 2) 石賀伸太郎 近畿大学奈良キャンパス里山林における中型土壌動物の分布と動態、近畿大学大学院農学研究科修士論文 (2006)
- 3) Soil Sci. Plant Nutr 第 50 巻 第 5 号 Land Use Dynamics and Nutrient Characteristics of Soils and Plants along Topo-Sequences in Inland Valley Watersheds of Ashanti Region, Ghana Ebenezer Annan-Afful 2004 年
- 4) Soil Sci. Plant Nutr 第 50 巻 第 5 号 Nutrient and Bulk Density Characteristics of Soil Profiles in Six Land Use Systems along Topo-Sequences in Inland Valley Watersheds of Ashanti Region, Ghana Ebenezer Annan-Afful 2004 年
- 5) TROPICS Vol.12 (2) 131-146 Micro spatial distribution pattern of litterfall and nutrient flux in relation to soil chemical properties in a super wet tropical rain forest plot, West Sumatra, Indonesia Hermansah 2003 年
- 6) TROPICS Vol.7 (3/4) 209-222 Spatial Distribution Pattern of Trees in relation to Soil Edaphic Status in Tropical Rain Forest in West Sumatra, Indonesia I.Distribution of Accumulating Trees Tsugiyuki MASUNAGA 1998 年
- 7) シロアリと生存圏科学—シロアリは地球を救うか?— 吉村剛 2005 年 p30 ~ 37
- 8) 山口泰央 2007 近畿大学農学部里山林におけるササラダニ類の個体数、種数(属数)と植生の関係 近畿大学農学部卒業論文
- 9) 世界珍虫図鑑 改訂版 川上洋一 著 上田恭一郎 監修 柏書房 2007 年 200pp
- 10) 前原 忠 利尻島の土壌動物 利尻研究 (22) 55-72 2003 年
- 11) 土肥要旨集 第 50 集 (2004) Part II シロアリとミミズが造成する塚土壌 河口定生 (九大院農) 他 317pp
- 12) 日本生態学会誌 54 117-124 アフリカニジェールにおける過度土地利用による土壌養分減少とシロアリ塚による養分保持 竹下正哲・新谷 融 (2004)
- 13) 日本土壌肥科学雑誌 第 48 巻 第 9, 10 号 437-438 土壌の B/F 値 (細菌数/糸状菌数) について 加藤邦彦・古川栄一・都留信也・鈴木達彦 (1977)
- 14) シロアリの生態 熱帯の生態学入門 安部琢哉 著 東京大学出版会 (1989) pp142 ~ pp143
- 15) 土壌動物の世界 渡辺弘之 著 東海大学出版会 (2002) pp56 ~ pp57
- 16) 熱帯農業 47 (5) (2003) 306 ~ 310 熱帯域の農耕樹園地に生息する土壌動物—キーストーン種 ミミズの生態・機能・役割について— 松本貞義
- 17) 土壌動物の世界 渡辺弘之 著 東海大学出版会 (2002) pp14 ~ pp15



ササラダニ亜目 (日本)



カニムシ目 (日本)



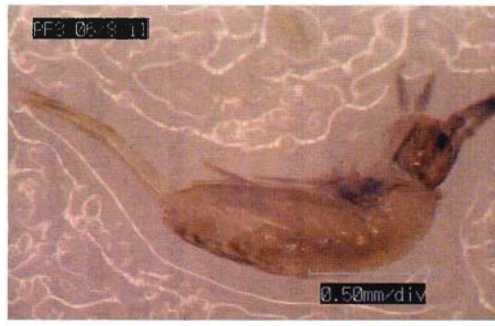
フシトビムシ亜目 (日本)



ササラダニ亜目 (ガーナ)



カニムシ目 (ガーナ)



フシトビムシ亜目 (ガーナ)



ササラダニ亜目 (インドネシア)



カニムシ目 (インドネシア)



フシトビムシ亜目 (インドネシア)