

第4章 温暖化緩和策が生物多様性等に与える影響 ー 土壌への有機物投入を対象とした文献サーベイからー

田中淳志

1. 背景と目的

人類の活動は世界規模での地球温暖化を進行させており、それによりさまざまな産業活動に深刻な被害が生じる危険性が指摘されている（IPCC（2007））。農業分野に関わるものでは、農産物生産量や降水量、生物多様性などへ大きな影響を与えられている（Millennium Ecosystem Assessment（2007））。実際にわが国の生産現場においては、高温障害等地球温暖化によるものと思われる農作物への影響が全国各地で発生しており、例えば、水稻では登熟障害、りんご・みかん・ぶどう等では着色不良・着色遅延、病害虫の多発、葉茎菜類では生育不良、乳用牛では乳量・乳成分の低下等が報告されている（農林水産省 2010）。そのような中、国際的には農地での炭素固定は、地球温暖化防止に貢献する農業の持つ正の外部性と捉えられ（FAO（2012））、農林水産省では、地球温暖化防止、生物多様性の保全等の地球環境問題への貢献の取組を総合的・体系的に推進するため、農地への有機資材投入による炭素固定が検討されている（農林水産省（2008a）；農林水産省（2008b））。

19世紀以降、今日耕作されている農地の25～50%が、不適切な営農行為により1m³当たり2.5～6kgの炭素を失ったとする推計が存在し（Bolin（1977））、また、農地の土壌攪乱や土壌有機物（SOM）の損失は、土壌生物多様性の減少を引き起こしていると言われている（Stewart（1991））。しかしながら、これに対する直接的な証拠は不足しており、土壌生物の多様性や栽培方法の変化による土壌有機質へのインパクトは、土壌固有の特性や営農行為に依存していると考えられている。

農地の土壌を適切に管理することによる炭素固定は、京都議定書で認められた温室効果ガス（GHG）吸収源活動の1つであり、議定書第3条4項では「農用地の土壌並びに土地利用の変化及び林業の区分における温室効果ガスの発生源による排出量及び吸収源による除去量の変化に関連する追加的な人の活動のいずれに基づき、附属書Iに掲げる締約国の割当量をどのように増加させ又は減ずるかについての方法、規則及び指針を決定する」（外

務省（1997））こととし、吸収源による吸収量の計算方法や目標とする排出削減率の中での限度枠等を検討事項とした。その後のボン合意及びマラケシュ合意を経て、農地管理や牧草地管理による吸収源活動の細則が定められた（GISPRI（2002））。その中では、地上バイオマス、地下バイオマス、落ち葉、枯れ木、土壌有機炭素を炭素収容力（carbon pool）として計算することができることとしている。京都議定書の定める第一約束期間（2008～2012年）においては、先進国全体の温室効果ガスの合計排出量を1990年に比べて5%以上削減することを全体的目標とし、ポルトガル、カナダ、デンマーク、スペインが農地管理による温室効果ガス吸収源活動に取り組んでいる。当時のわが国は、農地がどの程度炭素を固定するのか科学的知見が乏しかったためこの取り組みを選択しなかったが、第二約束期間（2013～2018年）以降には選択することを検討し、全国の農地土壌に堆肥を施用した場合の炭素貯留の増加量を試算している（農林水産省（2007））。上記の4か国では、不耕起栽培によるCO₂発生抑制を主な炭素固定手段として用いているが、温暖で湿潤な気候を持つわが国は雑草繁茂の問題等があり、農地への有機資材の投入により炭素を固定することを検討している。農林水産省（2008a）では、農地土壌への堆肥の施用に伴い、年間約193～204万t-Cが固定され、我が国の第一約束期間における削減目標量2,063万t-C（CO₂換算7,655万t-CO₂：1990年の総排出量の6%）の約1割に相当すると試算しており、有機資材の投入シナリオ次第で、この炭素固定量は増減する（Yokozawa et al.（2010））。

2011年11月に南アフリカのダーバンで開催された気候変動枠組条約第17回締約国会議（COP17）において、わが国は、ロシア、カナダとともに京都議定書の定める第二約束期間における排出削減目標への参加を拒否した。日本の主張は、現在の京都議定書では先進国にのみ排出削減目標が設定されるため、中国などの新興国・途上国も含むすべての国が参加する実効性ある新たな枠組を策定すべきというものであった。一方で新興国・途上国は、引き続き第二約束期間において先進国のみが排出削減目標の達成義務を負うべきと主張した。最終的に、日本は参加しない形で京都議定書の第二約束期間の継続は合意され、加えて、アメリカ、中国、インドなどを含むすべての国が参加し、温室効果ガス削減の法的拘束力を持つ新たな枠組の設置に向けた交渉を始めることも合意し、交渉の場（ダーバンプラットフォーム）が設けられたが、これはEUが第二約束期間を受け入れる代わりに中国やインドに包括的で拘束力のある枠組への合意を強力に迫った結果である。日本は第二約束期間へは参加しないが、気候変動枠組条約を批准しており、引き続き温室効果ガス削減に向けた取り組みを進めることとなった。有機資材を投入すると、有機物中に含

まれる炭素は微生物の栄養分として次第に分解され、二酸化炭素として大気中に放出されるが、難分解性の物質は長期間土壌有機炭素として貯留される。このような炭素を農地に固定する温暖化緩和策は、土壌微生物などの生物多様性にも影響を与えることが考えられ、そのようなコベネフィットを明らかにすることは、この取り組みの意義を増し、取り組みを推進する上での大きな動機となる。第3章で解説した通り、環境省（2010）では、コベネフィットを「相乗便益とも言い、温室効果ガス排出削減など、温暖化対策を行うと同時に得られる、エネルギー効率の改善や大気汚染の改善など、異なる分野での好ましい効果のことをいう。環境破壊や貧困・地域格差など、途上国が抱える開発問題に関してコベネフィットが実現すれば、温暖化対策に対する途上国側の意識が変化し、主体性を高めることができる」と期待されている」としており、何らかの行動に伴う異なる分野への相乗効果をさすことが分かる。本稿でのコベネフィットとは、温暖化対策に伴う生物多様性等への外部経済を指しており、狭義の温暖化対策のコベネフィットに該当する。

本稿では、狭義の温暖化対策のコベネフィットとして、生物多様性への影響に着目し、有機資材の投入を行う農法と慣行農法の比較事例について、有機農業の事例を中心に過去の文献を調査し、有機資材の投入が特に土壌生物の生物多様性にどのような影響を与えるのかを明らかにし、有機資材の投入による農業生産への影響についても言及することを目的とする。

2. 有機資材投入と生物多様性

生物多様性の定義には様々なものがあるが、生物の多様性に関する条約（Convention on Biological Diversity）の第二条では、「種内の多様性、種間の多様性、生態系の多様性の3つを含む」と定義されている（生物多様性センター（1993））。種内の多様性とはある場所に生息する同一種の持つ遺伝子に多様性があったり、ある種が、生息場所毎に遺伝子の異なる個体群を形成しているようなことを指している。種間の多様性とは、小さなコードラート⁽¹⁾から、農場、湿地、半島といった様々なスケールにおいて、多くの異なる動植物種が生息していることを指す。また生態系の多様性とは、気温や降水量などの気候、地質や標高などの異なる様々な地域に、異なる生態系が存在することを指す。

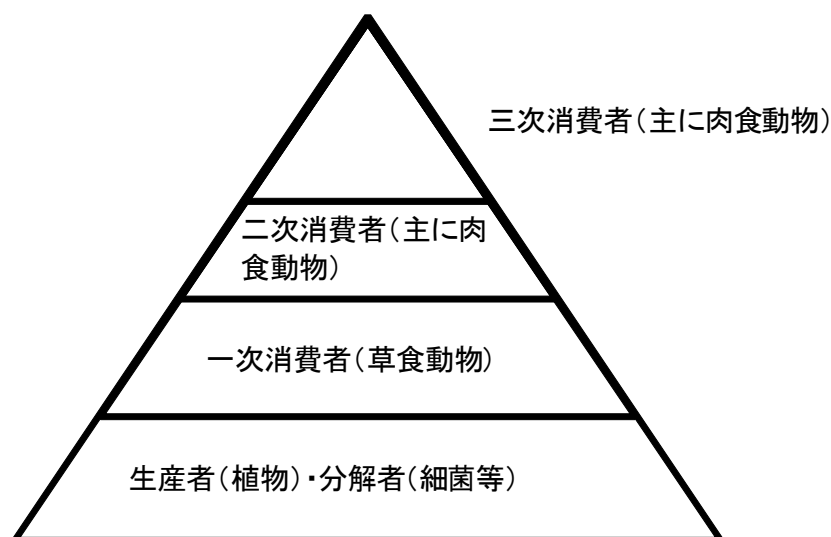
生き物を大きく分類すると、哺乳類、鳥類、魚類、昆虫類、甲殻類、貝類、両生類、爬虫類、蜘蛛形類、多足類、貧毛類、原生動物、維管束植物、非維管束植物（藻類、蘚苔類、

地衣類)、菌類などとなり、わが国の農地には、これらすべての分類群が出現すると考えられる。特に水田は、湿地としての機能を持ち、稲作時に出現する一時的な湛水域は、河川や湖沼と連続した水系となることで、畑作の圃場では考えられないような大型の魚類や貝類などが出現する。またそれを捕食するために哺乳類や鳥類が水田を狩りの場として利用する。結果として水田には多様な分類群にまたがる豊富な種が生息できる。

生物には食物連鎖があり(第1図)、有機資材の投入により直接的な影響を受けるのは、原生動物、貧毛類、細菌、植物などの食物連鎖の底辺に位置する生物である。また、これらを捕食する草食や肉食動物が間接的に影響を受ける。

有機資材とは、落ち葉、枯れ木、木炭、バーク堆肥、牛ふん堆肥、完熟稲ワラ堆肥、稲ワラ、小麦ワラ、水稻根、モミガラ、豚ふん、オガクズ堆肥等を指し、土壤に有機炭素が蓄えられ、木炭のように土壤改良の効果が高いとされるようなものも含まれる。有機農業では一般的に、上記のような有機資材を投入し、また酢を原料とする農薬などの使用も認められるが、自然農法と呼ばれるものでは、牛ふんなどの動物性肥料や農薬を一切使用しない。本稿では、自然農法を含む有機農業において、有機資材の投入による生物多様性への影響を調べる。

有機炭素は生物に摂取され、呼吸により CO_2 として排出されるものもあるが、木質の有機資材などに多く含まれる難分解性の有機炭素は極めて安定しており、分解されずに長期間土壤中に貯留される。



第1図. 圃場生態系の栄養循環(食物連鎖)⁽²⁾

3. 文献サーベイの方法と対象の限定

本稿で文献サーベイの対象とする範囲は以下のとおりである。まず対象とする生物については、有機資材の投入により直接の影響を受ける生物のうち、既存文献が比較的多く存在する微生物（菌類，原生動物等）に主に注目し，投入の影響をまとめる。それより上位に位置する動物は，餌資源としての原生動物や貧毛類などの土壤動物の増減以外にも，農地周辺の生息地改変による影響等，広範囲なハビタットの状況に影響を受けることもあり⁽³⁾，現時点で有機資材投入による影響の研究が進んでいるとは言えないため，本稿でも文献サーベイの対象として取り上げない。また，栽培作物以外に農地で繁殖する植物（雑草）への影響に関しては，土壤養分やそれを消費する土壤動物による影響を間接的に受けると考えられるため，現時点では検討しない。

また，土壤への有機資材の投入による影響については，慣行農法と有機資材を投入する有機農法を同地域で同時期に比較した論文を取り上げることで各項目の比較を行う。調査項目の属性としては，調査農地とコントロール農地の農法，土壤特性，気温，降水量，農地のサイズ，有機資材投入をしてからの期間，調査実施期間，作付け作物等とした。また，生物多様性の評価法としては生物種数や生息数などの指標があるが，生物種数に関する研究蓄積は非常に限られるため，本稿では主に各生物種の生息数を足し合わせた生物量（バイオマス）に着目することで生物多様性への影響の議論を行う。この他，農薬の散布，土壤特性，農地のサイズ，有機資材投入をしてからの期間，作付け作物の違いによる影響，および有機物投入と農業生産量の関係についても概観する。

4. 結果と考察

（1）有機資材投入による生物量の変化

文献サーベイの結果は第1表にまとめた。各調査結果を見ると，有機農法では，細菌や菌類の量と活動が増加するという一般的傾向があることが窺える（Bossio et al. (1998), Gunapala and Scow (1998), Scow et al. (1994), Yeates et al. (1997), Reganold et al. (1993), Fraser et al. (1988), Shannon et al. (2002)）。例えば，Fraser et al. (1988) は，有機農法では慣行農法に比べて微生物量が10～26%増加したことを報告しており，これは有機農地への堆肥及び緑肥の投入が主な要因であり，有機炭素が有意に多く投入され

ることにより細菌量を増やしていると指摘している。またReganold et al. (1993) は、有機農法では土壌中に有意に有機物質が多く、その結果として微生物活動が高く、より多くのミミズがいるとしている。Gunapala and Scow (1998) では、慣行農地より低投入農地および有機農地で、微生物量と微生物の活動は有意に多く、この最大の要因として、農地に投入される炭素の量をあげている。これらのことから、農地への有機資材投入によるGHG吸収対策が、有機炭素の供給を通じて土壌微生物の餌としても働き、土壌微生物量を増加させることに寄与すると言える。

ただし、全体としての微生物量とは異なり、全ての生物分類群で生物量が増加するとは限らない。そこで、微生物群集ごとに生物量を見ると、有機農法と慣行農法との微生物群集の違いは、細菌、菌類や貧毛類などの分類群毎に異なる結果が得られている(Wander et al. (1995), Foissner (1992), Yeates et al. (1997), Shannon et al. (2002), Girvan et al. (2003))。その理由としては、年に1度のみなど調査回数が少なく、正確な評価ができなかった(Wander et al. (1995))、原生動物や線虫の個体数は慣行農地より有機農地の方が多かったがツリミミズ科の個体数には有意な変化がなかった(Foissner (1992))、クマムシやコナダニは増加したがツリミミズは逆に少なかった(Yeates et al. (1997))、全炭素量や微生物バイオマス炭素量などの多くのパラメーターで、有機資材を投入するか慣行農法かで土壌微生物群集に有意な差はなかったが、菌類の総量及び活性菌類(active fungi)は、有機土壌でより多く、また、不活性で培養不可能な菌類を計測する手法が現時点で存在しないため土壌微生物をすべて調査しきれないこと(Shannon et al. (2002))などが挙げられ、様々に存在する土壌微生物を網羅的に調査することの難しさが存在している。またGirvan et al. (2003) では、有機農地と慣行農地の土壌の物理特性に有意な違いがなく、有機農地で菌類が有意に増加しなかったとしているが、有機物投入量の多寡により影響の出方が異なると思われる。

農地への有機資材投入によるGHG吸収対策が微生物量を増加させることは、火山性土壌での有機炭素量を調査し、微生物量は土壌有機態炭素量と相関関係があることを示したNishiyama et al. (2001) の研究と矛盾しない。土壌中での微生物数の増加は、収穫後の作物残渣の投入や有機農法への転換による、土壌への有機炭素投入量の変化と関連付けられていると言える。加えて、土壌微生物の生息には、適度な大きさの土壌孔隙が必要(Nishiyama et al. (1992), Nishiyama et al. (1995)) とされ、この孔隙に60%の水分が満たされている時に好気性微生物の活動にとって最適であるというような報告もある

(Linn and Doran (1984), Seifert (1960))。

(2) 農薬による土壌微生物への影響

除草剤や殺虫剤の使用による土壌微生物群集への影響を調べたものでは、Reganold et al. (1993) が農薬のミミズへの負の影響を報告しているが、その他の文献では影響が顕著に見られなかったものが多い (Gunapala and Scow (1998), Scow et al. (1994), Doran et al. (1987), Stark (2008), Fraser et al. (1988))。その理由として Gunapala and Scow (1998) は、殺虫剤が IPM に沿って最小限に使われており、適切な施用の場合には、殆どの殺虫剤は微生物バイオマスとその活動に重大な影響を及ぼさないと思われるとしている。このことは、土壌微生物の世代交代の早さが原因と考えられ、バクテリアの中には、年間に 360 世代以上の交代を繰り返す例もあり (Bott and Kaplan (1985))、殺虫剤による影響を受けたとしても早期に個体数を回復させているものと思われる。

(3) 土壌特性、農地のサイズ、有機資材投入後経過期間、作付け作物等による生物への影響

土壌特性、農地のサイズ、有機資材投入後経過期間、作付け作物等の違いを考慮した上で、有機資材投入農法と慣行農法による土壌微生物への影響を比較しうる知見は多くなかった。有機農法と慣行農法の土壌線虫への影響を、土質ごとに調べた Yeates et al. (1997) では、線虫個体数全体では有機農法の方が多かったが、線虫の個別分類では、砂質やローム質など土質と農法により影響が異なった。一言で線虫と言っても、バクテリア食、菌食、肉食、植物病原（植物に感染し殺してしまうもの）、雑食、昆虫寄生（昆虫に寄生し養分を吸収するもの）などの摂食区分があり、たとえばバクテリア食の線虫は、沈泥土質中でのみ有機草地でより多く、シルトや砂地の農地では個体数にほとんど差がなかった。有機資材を投入してからの期間においては、土壌微生物の知見が乏しかったが、節足動物においては Hidaka (1997) は投入してからの期間が長いほど、稲の害虫であるウンカの天敵のウンカシヘンチュウの生息数が多いことを示している。

(4) 有機資材投入と農業生産量

有機資材を投入する有機農法による生物多様性の増加が農業生産量とどのように結びついているのかを系統的に研究した事例は少なかったが、慣行から有機農法へ移行する期間

において窒素成分の不足により収量が低下していた (Scow et al. (1994), Reganold et al. (1993))。また窒素の無機化のスピードが遅く、栄養不足により収量が低下している例もあった (Doran et al. (1987))。一般的に有機農法を行うと生産量が低下することが知られており、たとえば慣行農法と有機農法であるコウノトリ育む農法による稲作を比較した場合、生産量が3割程度減り、除草などの労働力が4割程度増加している (大沼・山本 (2009))。有機農法への移行後も生産量を維持するために、窒素不足を補う目的で側条施肥を行うことで、収量の低下を防ぐことができた例があったが (Scow et al. (1994))、そのために農家は追加の労働を必要としていた。Reganold et al. (1993) のニュージーランドの圃場での例では、慣行農法と比較して生産量が減少したが、調査期間中のニュージーランドでの有機・バイオダイナミック農産物の価格上昇により畜産や野菜でバイオダイナミック農業の方が農地面積あたりの利益が高くなることもあった。しかし現時点では慣行農業と同じか、それよりやや劣る利益をあげられるとしている。生産量が減少し、しかも労働力が増加するという農家にとってのデメリットを補うには、価格の面で慣行農法より有機資材を投入することにより生産される農産物の方が魅力的である必要がある。

第1表 有機資材を投入した農地での生物への影響（1／6）

A				B		C	D	E	F
第1表. 有機資材を投入した農地での生物への影響									
対象動植物	調査地数	サンプリングサイズ (共通)	有機資材を投入した農地の農法 (肥料、農薬、その他の方法)	コントロール農地の農法 (肥料、農薬、その他の方法)	調査農地とコントロール農地の特徴 (土壌、気温等)				
微生物	有機1、低投入1、慣行農法2の計4農法を各4地点	各農地で4度/年調査。一度に、直径2.5cmのコアを0～15cmの深さで30個採集	動物堆肥、有機農薬、その他肥料を投入	化学肥料、農薬を慣行量使用。低投入圃場では、化学肥料、農薬を少量使用	カリフォルニア。夏の平均気温32度、冬の平均気温8度、降水量635mm。地中海性気候				
2 Bossio et al.(1998)									
微生物	有機1、低投入1、慣行農法2の計4農法を各4地点	各農地で4度/年調査。一度に、直径2.5cmのコアを0～15cmの深さで30個採集	七面鳥堆肥67kg窒素相当/ha・year、魚粉4.5kg/ha・year、海藻4.7L/ha・year、緑肥121kg窒素相当/ha・year	窒素・リン・カリウムを計112kg/ha、殺虫剤使用	カリフォルニア。夏の平均気温32度、冬の平均気温8度、降水量635mm。地中海性気候				
2 Gunapala and Scow(1998)									
微生物、線虫	有機1、低投入1、慣行農地2(2年ローテーションと4年ローテーション)の計4農地	直径2.5cmのコアを各農地で20～30サンプル、深さ0～15cm、0～30cmで実験スターを経過した1992年に収集	有機：緑肥、堆肥、コンポスト、作物残渣。 低投入：無機肥料、作物残渣、緑肥	無機肥料、作物残渣	カリフォルニア。夏の平均気温32度、冬の平均気温8度、降水量635mm。地中海性気候				
3 Scow et al (1994)									
微生物	有機、有機+被覆作物、慣行の各1計3	18mX91mの3つの圃場において、各8つのサンプルを採集。表面0～10cmの土壌を採集。調査時期は11月のみ。	有機：牛の堆肥、クローバー干し草を尿素34kg/ha・年を散布後、アンモニア性窒素112kg/ha・年を側条施肥、139kg/haのカリウムを9年目に投入、リン14.6kg/ha・年、8,960kg/haの石灰を2年目に投入。	ペンシルバニア東部の気象					
4 Wander et al.(1995)									
微生物(原生動物、線虫、ミミズ、微小植物)	有機と慣行農地を各2計4、有機と慣行草地を各3計6	各地で8回採集。ミミズは6又は9回採集	草地：曝気したたい肥30t/ha・年、岩粉400kg(stonemeal)/ha・年。農地：完熟たい肥15t/ha・年、緑肥と岩粉700kg/ha・年	草地：窒素・リン・カリウムを200kg/ha・年、堆肥をいくらか。農地：窒素・リン・カリウムを200～400kg/ha・年、堆肥をいくらか。殺虫剤を使用	平均気温8.2度、降水量1309mm、標高500m。サルツブルグ(オーストリア)				
5 Foissner(1992)									
微生物(原生動物、線虫、ミミズ)	有機と慣行とバイオダイナミック農地各1の比較	25平方メートルのブルロット内で、6回サンプリング	リンとカリウムが100kg/ha・年となるだけの堆肥と玄武岩粉、コンポスト等	リン・カリウムを100kg/ha・年	平均気温5.7度、降水量936mm、標高650m。ステイリア(オーストリア)。褐色森林土				
6 //									
微生物(原生動物、線虫、ミミズ)	有機と慣行農地各1の比較	0.25平方メートルのサンプリングを8つ	堆肥を2t/ha・year、乾燥鶏糞を800kg/ha・year	窒素・リン・カリウム肥料を300kg/ha・yearと年間10回の殺虫剤噴霧	平均気温8.9度、降水量480mm、標高220m。オーストリア低地(Lower Austria)のMeiberg				
7 //									

第1表 有機資材を投入した農地での生物への影響（2／6）

G		H	I	J	K	L	M
比較農地サイズ		調査農地が有機を始めてからの期間		作物	作物生産量	除草剤、殺虫剤による土壌微生物への影響	調査結果まとめ
		調査期間					
1	Bossio et al (1998)	各農地 67mX18.3m	8年以上	1年	言及なし	言及なし	微生物炭素量は、慣行圃場に比べ、有機と低投入圃場で有意に多かった。有機と低投入間では有意に異ならなかった。
2	Gunapala and Scow(1998)	各農地 67mX18.3m	8年以上	2年	言及なし	農業の微生物バイオマスとその活動への影響は与えられなかった。IPMIに治った最小限の利便は影響を与えないと思われる。	慣行農地より有機および低投入農地で、微生物バイオマスと微生物活動は有意に多かった。様々な農地管理を行っていたが、微生物群集の速いのもっとも重要な要因は、農地に投入される炭素の量であった。
3	Scow et al (1994)	各農地 67mX18.3m	1年未満	5年	初年度は窒素不足によりトマトの収量が低下。窒素不足を補うために側条施肥を行った。低投入農地では、慣行農地と収量が同じ。有機農地の場合、有機への移行期間初期である1990年と1991年には収量が低く、土壌窒素レベルも慣行農地よりも低かったが、4年目の1992年には慣行4年ローテーションと同じ、また慣行2年ローテーション以上の収量が得られた。	農薬は線虫の数に影響を与えなかった	有機に転換して4年間調査。微生物バイオマス量は、有機農地及び低投入農地で、慣行農地より有意に高かった。一方で、植物寄生する線虫数は有機農地及び低投入農地よりも慣行農地の方が有意に多く、1988年から1992年の間、慣行と比べ、有機と低投入農地では線虫数が増加したが、これはローテーションを採用する慣行農地で投入された作物残渣により豊富な炭素が含まれていたため。
4	Wander et al (1995)	18mX91mの3つの圃場	1年未満	10年	トウモロコシ、大豆、小麦(有機のみ)	言及なし	3つの農法間で活性微生物群集(viable microbial communities)は一般的にとても似通っていた。その理由として調査を11月の1度に行っていないからと推測。水の浸透率が、慣行農地と比較し、2つの有機農地(有機農地と、間作物有機農地)でより高かった。
5	Foissner(1992)	記述なし	10年	2年	小麦、牧草	言及なし	有機農地で慣行農地より原生動物、線虫の数が多かったが、ミミズの数は有意ではなかったが慣行農地の数がわずかに多かった。バイオマスでは原生動物は有機で、ミミズは慣行農地より有機農地で、有機草地より慣行草地で多かった。
6	"	記述なし	9年	1年	草地	言及なし	原生動物、線虫、ミミズのどれも、慣行農地と有機農地で違いはなかった。採草量と草の質に殆ど違いがなかった。
7	"	記述なし	9年	1年	ブドウ	言及なし	トリミミズの数が、有機の方が慣行農地より多かった。

第1表 有機資材を投入した農地での生物への影響 (3/6)

A			B		C	D	E	F
対象動植物	調査地数	サンプル採集サイズ (共通)	有機資材を投入した農地の農法 (肥料、農薬、その他の方法)	コントロール農地の農法 (肥料、農薬、その他の方法)	調査農地とコントロール農地の特徴 (土壌、気温等)			
微生物(原生動物、線虫、微小植物)	2	不明	コンポストと岩粉をミックスし10t/ha・year	窒素・リン・カリウム肥料を350kg/ha・year。殺虫剤使用	平均気温9.6度、降水量572mm、標高160m。オーストリア低地(Lower Austria)のMarchfeld. 石灰質の沖積土			
9 Yeates et al (1997)	1	不明	各調査地で、6農地*10サンプル、20mX20mの範囲を選択し、直径34cm深さ7.5cmのコアを5つ採取。各ペアは同じ地域	1か所のみ42トン/haの牛糞堆肥、他は投入ナシ。有機協会基準の認証を持つ	平均気温9.5度~9.6度、降水量820~1230、標高50~170m。ウェールズ			
10 Reganold et al (1993)	1	NZの畑と牧草地計16(慣行農地9とバイオダイナミック農地7)	直径15cmのコアを深さ0~15cm農地の境界から15mのところに、6X15mのプロットを8つ設定。それぞれのプロットで、0~15cmの土壌深さより、直径15x2cmの20個のサンプルを採取	バイオダイナミック	NZ北島			
11 Bolton et al. (1985)	1	隣接する320haの有機農地と、525haの慣行農地。各1か所内に、各8つのプロットを設置。各プロットで年3回、各12サンプルを採取	土壌深0~7.5cm、7.5~15cm、15~30cmから20サンプルずつ採取	エンドウ豆の緑肥	窒素96kg/ha、リン34kg/ha、硫酸16kg/haを投入。慣行の農薬を規定量使用 アメリカ・ワシントン州東部Palouse地方			
12 Doran et al. (1987)	1	有機2地点(堆肥+緑肥、緑肥のみ)、慣行1地点	土壌深0~15cmのサンプルを採取	動物堆肥とマメ科植物緑肥を施用	ペンシルベニア州南東部の慣行的コーン、大豆栽培農法 ペンシルベニア州南東部			
13 Stark (2008)	1	有機(緑肥のみ)と慣行農場を各1地点	1月、3月、5月に表層土壌0~15cmのサンプルを採取	堆肥は用いず、緑肥のみ。不耕起	化学肥料として、年間ha当たり70 kg N, 16 kg Pを投入。農薬も使用 ニュージーランドLincoln 大学の農場			
14 Fraser et al. (1988)	1	13(有機農法、化学肥料のみ施肥、除草剤および化学肥料を使用で各4農地+慣行栽培(化学肥料と除草剤と殺虫剤を使用)のトウモロコシ連作)の圃場。	土壌の深さ0~7.5、7.5~15、15~30cmで各20採取。1981~1982年にかけて3度採取	有機堆肥を施肥の4年輪作(オート麦、クローバー、コーン、大豆)	土壌はシルトクレイローム(Silty clay loam)、降雨量は年680mm、平均気温は11度 化学肥料のみ使用、または、除草剤および化学肥料を使用の4年輪作(オート麦、クローバー、コーン、大豆)			

第1表 有機資材を投入した農地での生物への影響（4／6）

	G		H	I	J	K	L	M
	比較農地サイズ		調査農地が有機機を始めてからの期間		作物	作物生産量	除草剤、殺虫剤による土壌微生物への影響	調査結果まとめ
			調査期間					
8 Foissner(1992)	記述なし	7年	1年	小麦	言及なし	言及なし	原生動物の数が、バイオダイナミック農地で有意に多かった 線虫個体数はすべてのサイトで、有機農法の方が多かった。個別には、バクテリア食の線虫は、ローム農地でのみ、有機農地でより多く、シルトや砂農地では変わらなかった。菌食の線虫は、すべてのサイトで有機農地の方が2倍程度多かった。一方で、ツリミミズ(Lumbricid)の個体数は、すべてのサイトで有機農法のほうが少なかった。	
9 Yeates et al.(1997)	記述なし	記述なし	1年	牧草	言及なし	言及なし	慣行農地ではミミズの量が有機農地の半分以下で、これは農薬の影響と考えられる	
10 Reganold et al.(1993)	バイオダイナミック農地は5～235ha、慣行農地7～445ha	8～18年	4年	野菜、リンゴ、ナシ、牛肉、羊肉、ミルク	言及なし	生産量は減少したが、調査期間中のNZの有機・バイオダイナミック作物の価格上昇により畜産や野菜でバイオダイナミック農地の方がヘクタール当たり利益が高くなることがあった。現時点では慣行農業と同じか、それよりやや劣る利益をあげられる	有意に有機物質が多く、微生物活動が高く、多くのミミズがいて、よりよい土壌構造があり、塊の密度が低く、容易に農器具を貫通でき、表層土が厚い。 土壌微生物、菌類、放線菌といった、生菌数(viable)の直接的な計測では、2つの農地で違いはわずかであったが、有機農地では酵素活動が有意に高く、より多くの活性土壌微生物(active soil microflora)が存在していると思われた。	
11 Bolton et al. (1985)	525ha	30年	1年	冬小麦、エンドウ豆	言及なし	慣行農法より長い間隔の輪作をしているため、有機農地のほうが冬小麦、春エンドウ	言及なし	
12 Doran et al. (1987)	記述なし	記述なし	5年	大豆とトウモロコシの輪作	言及なし	緑肥のみの農地では、緑肥由来窒素の無機化のスピードが間に合わず、収量が低下	殺虫剤、除草剤の微生物群集への影響はほとんどなかった	細菌やバクテリア群集は、緑肥のみを用いた農地で最大だったが、窒素欠乏の傾向があり作物収量は低下した。
13 Stark (2008)	記述なし	26年	1年	言及なし	言及なし	堆肥の施用などと比べると、土壌微生物群集にほとんど影響を与えなかった	言及なし	有機農法は、土壌微生物バイオマスとその活動に對し、明確に正の影響を持っておらず、慣行農場の方が微生物バイオマス量が有意に多かった。これは有機圃場が緑肥の低投入農地であるためであった。
14 Fraser et al. (1988)	12.1mX28.1m	7年	2年	オート麦、クローバー、コーン、大豆の4年輪作	言及なし	使用後4～24週間経過後において、土壌微生物群集と活動への影響はなかった	言及なし	土壌微生物バイオマス、細菌、菌の数は、慣行農地と比較し堆肥を施用されている農地で多かった。土壌密度は堆肥を施した土壌の0.0～7.5cmの層で、5%低かった。

第1表 有機資材を投入した農地での生物への影響（5／6）

A	B	C	D	E	F
対象動植物	調査地数	サンプル採集サイズ (共通)	有機資材を投入した農地の農法 (肥料、農薬、その他の方法)	コントロール農地の農法 (肥料、農薬、その他の方法)	調査農地とコントロール農地の特徴 (土壌、気温等)
15 Shannon et al.(2002)	微生物(菌類)	各フィールドでサンプルを6つ。3X2のグリッドを10m間隔で作	クローバーの緑肥有機、又は7年間肥料投入なしの有機	慣行農法	イギリス・レスター及びノーフォークの気象等条件
		慣行2、有機移行中2、有機機5、統合管理1の計10農地の比較			
16 Girvan et al.(2003)	微生物(菌類)	取	1圃場は七面鳥堆肥405kg/ha・yearを20年、他の圃場はイギリスの一般的有機農業	イギリスのGAP基準を順守	イギリス東部の気象等条件
17 Hidaka(1997)	ウンカとウンカシヘンチュウ	田んぼ計4（慣行2有機機2）	植物コンポスト、農薬不使用	化学肥料0.5to1.0t、農薬使用	広島
	塵とりへのたたき落としと、その後の目視、各農地で毎回10～200サンプル				
18 "	"	田んぼ計2（有機1低投入1）	冬季マメ科植物200kg、農薬不使用、不耕起		広島

第1表 有機資材を投入した農地での生物への影響（6／6）

G		H	I	J	K	L	M
比較農地サイズ		調査農地が有機を始めてからの期間		作物	作物生産量	除草剤、殺虫剤による土壤微生物への影響	
		調査期間		調査結果まとめ			
15	Shannon et al.(2002)	記述なし	7年～10年	2年	小麦、クロールバー、オート麦、大麦、豆	言及なし	全炭素量や微生物バイオマス炭素などの多くのパラメーターで、有機か慣行かで土壤微生物群集（菌類）に有意な差はなかった。一方で、菌類の総量及び活性菌類(active fungi)は、有機土壌でより多かった。
16	Girvan et al.(2003)	20mx20m	2年	1年	菜種、エンドウ豆、冬小麦・大麦、てんさい等	言及なし	有機農地と慣行農地の間に、土壌の物理特性に有意な違いがなく、有機圃場でより多くの有機物があるということもなかった。同様に、有機農地で細菌数が有意に増加することもないかった。
17	Hidaka(1997)	記述なし	5年以上	3年	コメ	言及なし	慣行農地と比べ、害虫であるトビイロウンカが有機農地の方が少なく、これは定住性の線虫であるウンカシヘンチュウ(Agamermis unka)がトビイロウンカへ寄生し数が抑制されていたからであった。对象的に、集約的に稲作を行っている農地では、トビイロウンカが非常に豊富で、ウンカシヘンチュウが生息していなかった。
18	〃	記述なし	5年以上	3年	コメ	言及なし	不耕起と冬季マメ科のマルチを行っている低投入有機農業の農地では、慣行農地と比べてセジロウンカ（Sogatella furcifera）がより少なかったが、このウンカを捕食する定住性コモリグモは、伝統的な有機農地より多かった。これは、不耕起により土壌表面のかく乱が少なくコモリグモなどの定住性の生物に有利であるためと考えられた。

（５）農地の生物環境指標としての土壌有機炭素量

OECD（2003）においてかつて、土壌有機態炭素量を農地の生物多様性を示す環境指標としようか議論が行われたことがある（OECD Expert Meeting on Soil Erosion and Soil Biodiversity Indicators）。この時点では、限られた加盟国でしか、農地の土壌有機態炭素のモニタリングを行っておらず本格的な指標となることは見送られた。遺伝子による土壌微生物の検出・識別方法は近年目覚しく発展しているが、不活性な菌類を含めた土壌微生物の種をすべて同定し、バイオマスを測るまでの技術が存在せず（土壌微生物研究会（1998））、その意味では今後の研究の進展を待つ必要がある。

加えて、わが国が取り組もうとしている農地への炭素固定が有機資材の投入によるものであるという事情が存在する。京都議定書の第一約束期間（2008～2010 年）において農地管理による炭素固定を選択している国々（ポルトガル、カナダ、デンマーク、スペイン）は、主に耕地での不耕起栽培、減耕起栽培により農地からの CO₂ の放出を抑えることで、農地での炭素固定をカウントしているが、わが国は水田を含めた農地に有機資材を投入することでの炭素蓄積を検討している。諸外国と異なるアプローチを取っており、わが国単独で科学的知見を積み上げていく必要がある。

（６）生物量増加以外のコベネフィット

Reganold et al.（1993）は、有機資材を投入し続けることで、微生物量が増加する以外に、表土が有意に慣行農地よりも厚く堆積することを指摘している。その結果、微生物活動が活発で、より多くのミミズが生息し、土壌塊の密度が低いため容易に農器具を貫通できるといったメリットを指摘している。

このことはもう一つのメリットに結びつく可能性もある。土壌に間隙が多くなることは、農地の貯水機能を高めることにつながり、例えば志村（1982）は、洪水防止機能に寄与する畑地の貯水容量を畑土壌の粗間隙の容量と考えて全国で 14 億 m³（1975 年）と見積もっており、また日本学術会議（2001）は、既往研究の整理から畑地土壌中の水貯留容量を 8 ～ 9 億 m³、地下水涵養量を全国で約 11 億 m³ と記している。有機資材投入による表層土壌の形成は、貯水容量を増加させ、洪水防止機能のような農地の多面的機能の向上に資する可能性がある。実際に Wander et al.（1995）では、水の浸透率が、慣行農地と比較し有機農地でより高かったことを示している。

（７）有機資材投入の技術的課題

有機資材には、バーク堆肥、牛ふん堆肥、モミガラ、小麦わら、稲わら等々さまざまな種類があり、分解しにくい成分が多い有機資材ほど、より多くの炭素が長期間貯留される。しかし、土壌への炭素貯留量を高めるために、有機質資材をやみくもに施用しても、土壌の養分を過剰にして作物の収量や品質を低下させ、養分の流出による環境汚染を引き起こす可能性もある。また、稲ワラを水田に施用すると、土壌の炭素蓄積量が増加するが、灌

水時に温室効果ガスであるメタンの発生量も増加する（西尾（2008））。温室効果ガスの固定と、環境汚染や温室効果ガス排出の間のトレードオフを見極めた上での対策を進めるために、どのような有機資材をどのような形態で、どのタイミングでどこに投入するのかについて、今後、実証実験等を通じて明らかにする必要がある。

有機農法による農産物生産量を最適化するには、窒素不足になって収量が落ちないように、堆肥を作る際に C/N 比を考慮する必要がある。C/N 比が高すぎると施肥をした際に土壌微生物は土壌の窒素を吸収し窒素不足が生じ、そのままでは収量が落ちるが、低すぎると逆に有機物の分解の際にアンモニアガスとして窒素が大気に出されることになる。

（８）有機資材投入の担い手

IPCC（2007）は、温暖化に対して人類は有効で経済的に実行可能な対策手段を有していること、そして 20～30 年以内に実効性のある対策を行うことで、温暖化による被害を大きく減らせるであろうことを示している。有機資材を投入する代表的な農業である有機農業は、消費者にとって安全かつ良質な農産物の需要の増大及び農業生産に由来する環境負荷の低減を目的（有機農業推進法 第三条）として推進されており、加えて、適切な投入による温室効果ガスの固定、土壌微生物量の増加の点でも寄与する可能性が大きいといえる。今後は、このような多数のコベネフィットをもつ取り組みを推進することが必要と思われる。

しかし、温暖化対策として人類に多くのベネフィットがあることは農家にとってもベネフィットが多いということを意味しない。「自分の農地の土壌動物が 10%増えたとしても、自分は何を得るのか？、収入も 10%増えるのか？収量が 10%増えるのか？」「より持続的に、安定的に収量が得られるのか」など、自身のメリットが存在するのかという問題を提起している。特に有機農法の場合には、生産量は一般的に減少してしまうか、慣行農法と同じレベルを維持するための追加的労力が必要となる。

したがって、取り組みにより収量や収入が減りつつも、温暖化対策、安全・安心な農産物生産、環境負荷削減、生物多様性への寄与といった外部経済性が生じているならば、その取り組みを進めるための社会的な支援策を検討する必要性があることを指摘したい。その際には、有機資材の投入を誰がどのような仕組みで行うのかということ、そして、圃場を所有する農家が投入を行うにしても、農家にメリットが存在しないならば、投入により生み出される一定の炭素固定量を義務として規制するのか、補助金を出して取り組みを進めるのか、取引できるような市場を創設するのか等の、政策目的を効率的に達成でき、取り組む者の利益を最適化する選択肢を検討する必要がある。

5. まとめ

炭素固定を目的とした農地への有機資材の投入による土壌微生物への影響は、生物量の

増加という点で明らかであった。これは、慣行農法と比較して、有機物の豊富な投入により菌類からの有機物の分解過程が強化され、より高次の栄養段階を占める土壤生物も量的に増加するためであった。また、各土壤生物分類群への個別の影響は、有機物の投入以外に圃場の土壤特性や水分条件にも影響を受けるため、個別に明らかにする必要がある、増加する生物量の質的な変化を詳細に明らかにすることは難しかった。この問題を解明するために分子生物学的アプローチも近年では用いられているが、土壤から DNA を抽出し、すべての微生物を量的・質的に解析することはまだできない。

また、慣行農法で使用される化学肥料や農薬は、多くの場合で土壤生物への影響が認められず、生物量はむしろ有機質の投入に影響を受けていることが明らかになった。有機農法による不利益としては窒素不足による作物の生産量の減少が多く見られ、このような課題を解決するために、窒素不足を補う有機質投入技術を開発する必要があるだろう。これらのことから、わざわざ有機農法へ転換せずとも、慣行農法において有機質を投入しつづけることで、炭素貯留がされ、コベネフィットとして土壤生物量を増加させ、作物の生産量を維持することも可能であるかもしれない。ただし、本研究の範疇外ではあるが、ネオニコチノイド系殺虫剤によると見られるミツバチや水田で見られる普通種のトンボの大幅な生息数減が近年大きな問題となっており、慣行農法による、土壤生物に限らない様々な生物の多様性への影響を明らかにし、対策を講ずる必要がある。

生物量増加以外のコベネフィットとして表層土壤の形成 (Reganold et al. (1993)) と、水の浸透率の上昇 (Wander et al. (1995)) がみられた。このことは、農地での水貯留容量の増加につながるため、洪水時などに農地が洪水防止機能をより多く発揮できる可能性がある。

炭素固定による GHG 排出量削減を目的とした土壤への有機資材の投入と、それに伴う土壤生物量の増加というコベネフィットの発現は、社会全体にとっては魅力的であるが、農家が実行するには現時点でメリットが見えないため、収入減や労働力増加となるならば、社会全体が相応の負担をする必要があるだろう。

〔注〕

- (1) コドラートとは、方形区ともいい個体数・種数などを調べるための単位となる枠のことである。
- (2) 三次消費者が生産者を食べることもあるし (雑食動物)、三次消費者の死骸を分解者が食べることもあるし、分解者 (ミミズなど) を二次消費者が食べることもある。
- (3) たとえば農地をえさ場として利用するネズミなどの小動物は、昼間の休息場所として草地や樹洞、河川敷の土手などの異なる土地区分を利用することがあり、また、えさ場としての農地が消失しても湿地などで代用できる場合もある。農地以外のハビタットも生息に利用する種の場合、えさ場、繁殖場、休息場などのどれか一つが改変された場合の生息状況への影響は、代替地の存在、代替えさの存在や移動能力の大小など、様々な要因が存在す

るため、農地の土壌管理の改変のみによる影響としてとらえることは難しい。

〔引用文献〕

- Bolin, B. (1977) ,”Changes of Land Biota and Their Importance for the Carbon Cycle”, *Science*, Vol.196, pp.613-615.
- Bolton, H, Jr., Elliott, LF, Papendick, R. I, and Bezdicek, D. F. (1985) ,”Soil microbial biomass and selected soil enzyme activities: effect of fertilization and cropping practices”, *Soil Biology and Biochemistry*, Vol.17, pp.297-302.
- Bossio, D. A., Scow, K. M., Gunapala, N. and Graham, K.J. (1998) ,”Determinants of soil microbial communities: Effects of Agricultural Management, Season, and Soil Type on Phospholipid Fatty Acid Profiles”, *Microbial Ecology*, Vol.36, pp.1-12.
- Bott, T. L. and Kaplan, L. A. (1985) ,”Bacterial Biomass, Metabolic State, and Activity in Stream Sediments: Relation to Environmental Variables and Multiple Assay Comparisons”, *Applied and Environmental Microbiology*, Vol.50 (2) , pp.508-522.
- Doran, J. W., Fraser, D. G., Culik, M.N, and Liebhardt, W.C. (1987) ,”Influence of alternative and conventional agricultural management on soil microbial processes and nitrogen availability”, *American Journal of Alternative Agriculture*, Vol.2, pp.99-106.
- 土壌微生物研究会編 (1998)『新・土の微生物 (3)』博友社。
- FAO (2012) ,”The state of food and agriculture 2012”, FAO, Rome.
- Foissner, W. (1992) ,”Comparative studies on the soil life in ecofarmed and conventionally farmed fields and grasslands of Austria Agriculture”, *Ecosystems and Environment*, Vol.40, pp.207-218.
- Fraser, D.G., Doran, J.W., Sahs, W.W. and Lesoing, G.W. (1988) ,”Soil microbial populations and activities under conventional and organic management”, *Journal of environmental quality*, Vol.17 (4) , pp.585-590.
- 外務省 (1997)「気候変動に関する国際連合枠組条約の京都議定書」
http://www.mofa.go.jp/mofaj/gaiko/treaty/pdfs/t_020413.pdf, (2013 年 5 月 23 日アクセス)
- Girvan, M. S., Bullimore, J., Pretty, J. N., Osborn, A. M. and Ball, A. S. (2003) ,”Soil Type Is the Primary Determinant of the Composition of the Total and Active Bacterial Communities in Arable Soils”, *Applied and Environmental Microbiology*, Vol.69 (3) , pp.1800-1809.
- GISPRI (2002)「COP7 マラケシュ合意の決定文書暫定和訳」
<http://www.gispri.or.jp/kankyo/unfccc/COP7020121.html>, (2013 年 5 月 23 日アクセス)
- Gunapala, N. and Scow, K. M. (1998) ,”Dynamics of soil microbial biomass and activity in

- conventional and organic farming systems”, *Soil Biology and Biochemistry*, Vol.30 (6) , pp.805-816.
- Hidaka, K. (1997) , “Community structure and regulatory mechanism of pest populations in rice paddies cultivated under intensive, traditionally organic and lower input organic farming in Japan”, *Biological Agriculture and Horticulture*, Vol.15, pp.35-49.
- IPCC (2007) ”IPCC Fourth Assessment Report: Climate Change 2007”.
- 環境省 (2010) 「環境省パンフレット 地球のために、今、私たちができること。」
<http://www.env.go.jp/guide/gyomu/html/index.html>, (2010 年 8 月 2 日アクセス)
- Linn, D. M. and Doran, J. W. (1988) , “Aerobic and Anaerobic Microbial Populations in No-till and Plowed Soils”, *Soil Science Society of American Journal*, Vol.48, pp.794-799.
- Millennium Ecosystem Assessment (2007) 『国連ミレニアム エコシステム評価 生態系サービスと人類の将来』 オーム社。
- 日本学術会議 (2001) 「地球環境・人間生活に関わる農業及び森林の多面的な機能の評価について(答申)」。
- 農林水産省 (2007) 「農地土壌が有する多様な公益的機能と土壌管理の在り方 (1)」
http://www.maff.go.jp/j/study/kankyo_hozen/04/pdf/data2.pdf, (2013 年 5 月 23 日アクセス)
- 農林水産省 (2008a) 「地球温暖化防止に貢献する農地土壌の役割について」
http://www.maff.go.jp/j/kanbo/kankyo/seisaku/pdf/nochi_dozyo.pdf, (2013 年 5 月 23 日アクセス)
- 農林水産省 (2008b) 「今後の環境保全型農業に関する検討会報告書」
http://www.maff.go.jp/j/study/kankyo_hozen/pdf/h2004_report.pdf, (2013 年 5 月 23 日アクセス)
- 農林水産省 (2010) 『平成 21 年度 食料・農業・農村白書』。
- 西尾道徳 (2008) 「日本も農地土壌の炭素貯留機能を考慮」『環境保全型農業レポート』No.101。
- Nishiyama, M., Senoo, K., Wada, H., and Matsumoto, S. (1992) , “Identification of soil micro-habitats for growth, death and survival of a bacterium, γ - 1, 2, 3, 4, 5, 6-, hexachlorocyclohexane-assimilating *Sphingomonas paucimobilis*, by fractionation of soil”, *FEMS microbiology ecology*, Vol.101(3), pp.145-150.
- Nishiyama, M., Senoo, K., and Matsumoto, S. (1995) , “Survival of a bacterium in microporous glass in soil”, *Soil Biology and Biochemistry*, Vol.27 (10) , pp.1359-1361.
- Nishiyama, M., Sumikawa, Y., Guan, G. and Marumoto, T (2001) , “Relationship between microbial biomass and extractable organic carbon content in volcanic and non-volcanic ash soil”, *Applied soil ecology*, Vol.17 (2) , pp.183-187.
- OECD (2003) , “OECD Expert Meeting on Soil Erosion and Soil Biodiversity Indicators”,
<https://community.oecd.org/streamPage.jspx?cwsDb=Soil%20Erosion%20and%20Soil%2>

- 0Biodiversity%20Indicators&community=2283, (2013 年 5 月 23 日アクセス)
- 大沼あゆみ・山本雅資 (2009) 「兵庫県豊岡市におけるコウノトリ野生復帰をめぐる経済分析—コウノトリ育む農法の経済的背景とコウノトリ野生復帰がもたらす地域経済への効果—」『三田学会雑誌』 102 (2), pp.3-23.
- Reganold, J. P., Palmer, A. S., Lockhart, J. C. and Macgregor, A. N. (1993), "Soil Quality and Financial Performance of Biodynamic and Conventional Farms in New Zealand", *Science*, Vol.260 (5106), pp.344-349.
- Scow, K. M., Somasco, O. Gunapala, N., Lau, S., Venette, R., Ferris, H., Miller, R. and Shennan, C. (1994), "Transition from conventional to low-input agriculture changes soil fertility and biology", *California Agriculture*, Vol.48 (5), pp.20-26.
- 生物多様性センター (1993) 「生物の多様性に関する条約」
http://www.biodic.go.jp/biolaw/jo_hon.html, (2013 年 5 月 23 日アクセス)
- Seifert, J. (1960), "The influence of moisture and temperature on the number of microorganisms in the soil", *Folia Microbiologica*, Vol.5 (3), pp.176-180.
- Shannon, D., Sen, A. M. and Johnson, D.B. (2002), "A comparative study of the microbiology of soils managed under organic and conventional regimes", *Soil Use and Management*, Vol.18, pp.274-283.
- 志村博康 (1982) 「水田・畑の治水機能評価」『農業土木学会誌』 50(1), pp.25-29.
- Stark, C.H. (2008), "Are soil biological properties and microbial community structure altered by organic farm management?", 16th IFOAM Organic World Congress, Modena, Italy, June 16-20.
http://orgprints.org/11557/1/Stark_11557_ed.rtf, (2013 年 5 月 23 日アクセス)
- Stewart, W. D. P. (1991), "The importance to sustainable agriculture and biodiversity among invertebrates and microorganisms", *The Biodiversity of Microorganisms and Invertebrates: Its Role in Sustainable Agriculture*, Ed. DL Hawksworth, pp.3-6, Redwood Press, Melksham.
- Wander, M. M., Hedrick, D. S., Kaufman, D., Traina, S. J., Stinner, B. R., Kheirmeyer, S. R. and White, D. C. (1995), "The functional significance of the microbial biomass in organic and conventionally managed soils", *Plant and Soil*, Vol.170, pp.87-97.
- Yeates, G. W., Bardgett, R. D., Cook, R., Hobbs, P. J., Bowling, P. J. and Potter, J. F. (1997), "Faunal and Microbial Diversity in Three Welsh Grassland Soils Under Conventional and Organic Management Regimes", *Journal of Applied Ecology*, Vol.34 (2), pp.453-470.
- Yokozawa, M., Shirato, Y., Sakamoto, T., Yonemura, S., Nakai, M. and Ohkura, T. (2010), "Use of the RothC model to estimate the carbon sequestration potential of organic matter application in Japanese arable soils", *Soil Science and Plant Nutrition*,

Vol.56 (1) , pp.168-176.