特集「食とみどりのLCA」

解説

農地管理による土壌炭素貯留効果と気候変動の緩和

白戸 康人

Soil Carbon Sequestration by Cropland Management and Mitigation of Climate Change

Yasuhito SHIRATO

Synopsis: Soil organic carbon (SOC) is a huge and important component of the global carbon cycle. Agricultural soils can be either a sink or a source of atmospheric CO₂, depending on the balance between the input of carbon (C) to soils and the output of C through decomposition. We can change this balance by changing agricultural soil management, understanding the mechanisms of SOC turnover. Not only the quantity but also the quality of input C affects SOC balance, and environmental conditions such as temperature and moisture of soils as well as inherent properties of soils such as texture affect the decomposition rate of SOC. Since there are many factors affecting SOC balance, SOC turnover models are very useful tools to evaluate the effect of management practices on SOC balance. The RothC model, one of leading SOC models in the world, was validated against long-term experiments in Japan and Thailand, and modified RothC models for paddy soils and for Andosols was developed. The country scale potential of soil carbon sequestration was estimated, then, by using the RothC model for Japanese arable lands. The use of LCA, which includes not only changes in SOC, but also CO₂ emissions from the use of fossil fuel in agricultural production processes, is effective and essential in evaluating the effects of agricultural management practices on climate change mitigation. It is important, too, to include other green house gases (CH₄ and N₂O), other environmental impacts (e.g. nitrate nitrogen in soils and water), and impacts on agricultural productivity, in evaluation of agricultural management practices.

Keywords: Agricultural soils; carbon sequestration; climate change; mitigation; soil organic matter

1. 土壌炭素と気候変動緩和の関係

IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change: 気候変動に関する政府間パネル) の第4次評価報告書 (IPCC, 2007) は、「地球温暖化を引き起こすCO₂などの温室効果ガス濃度が上昇している原因は、主として化石エネルギーの消費によるCO₂排出量の増加であること」を以前よりも断定的に述べた。また、2008年からは、京都議定書の第1約束期間 (2008～2012年) が始まった。日本は、この期間における国全体の温室効果ガスの排出量を1990年に比べて6%削減する義務があるが、2008年の時点では逆に1.6%の増加となっており、今後は一層の削減努力が必要な状況である。第一の対策となるのは、言うまでもなく、省エネなどで化石燃料の消費を抑えることであるが、本稿では、別の点にスポットを当てる。

それは、化石燃料の燃焼ではなく、森林、農地などの「土

地」から放出されたり吸収されたりしている温室効果ガスの存在である。例えば森林伐採などの土地利用変化によるCO₂の放出がそれに該当するが、その量は、後述するようになかなりの大きな量になることが知られている。従って、土地の管理方法を工夫することによって土地からの温室効果ガスの排出を減らしたり吸収を増やすことは、有効な温暖化緩和策のひとつとなる。事実、京都議定書の日本の削減義務6%のうち3.8%は森林吸収源で賄われる予定となっている。森林吸収源という言葉からまず連想されるのは、光合成によりCO₂を吸収して生長する樹体部分であろうが、樹木の下にある土壌の中にも、土壌有機物として多量の炭素が存在している。土壌有機物は、植物の遺体が土に還ってできたものなので、土壌炭素は、もとはといえば植物が光合成して吸収したCO₂に由来する。従って、土壌中の炭素が増加すれば、その分、大気中のCO₂が減った勘定にな

るため、土壌も森林の樹体と同じような意味でCO₂の吸収源と考えることができる。

地球全体でみると、土壌中には約2500Pg (Pg=ペタグラム: 10¹⁵g) の炭素が存在すると見積もられており、これは大気CO₂ (760PgC) の約3.3倍、陸上の植物バイオマス (560PgC) の約4.5倍に相当する (Lal, 2004)。地球全体の土壌炭素量の推定値には幅があり (田村, 1996; 伊藤, 2002)、上記は一例にすぎないが、いずれにしても土壌中の炭素量は地球全体で見ると非常に多量であるため、そのわずかな増減が地球規模の炭素循環に大きく影響すると考えられている。実際、例えば、先史時代から現在までに土壌有機物の減少で放出された炭素は、人類が化石燃料の消費により放出した炭素量の2倍以上になるという試算がある (Lal, 2004, 袴田ら, 2000)。わかりやすい例として、もともと森林や草原だった頃に土壌中に蓄えられていた炭素が、開墾されて畑になったために次第に分解して減少した場合などがこれに該当する。

このことは、逆に、劣化した土壌が適切な管理の下で修復されれば土壌に炭素を蓄積させることにより土壌を炭素の大きな吸収源とする可能性があることを意味する。もちろん、全ての農地を太古の昔のような自然植生に戻すことで先史時代の土壌炭素レベルを復元するのは非現実的ではあるが、現在の農地で農業生産を続けながらも、管理方法を工夫することにより、土壌中の炭素を増加させることはある程度可能である。実際に、土壌炭素を増加させることで、地球全体の農地ではどの程度の大きさの炭素吸収による気候変動緩和の可能性があるか、さまざまな見積もりがなされている。例えば、Paustian et al. (1997) では、20 ~ 30PgC、Lal (2004) では、先史時代から現在までに失われた全土壌有機炭素量 (55 ~ 78PgC) の50 ~ 66%程度と見積もられているが、いずれにしても、巨大なポテンシャルを有することが認識されている。

2. 土壌炭素量増減のメカニズムと農地管理

土壌炭素量の増減は、土壌に投入される炭素の量 (入力) と分解されて土壌から出て行く炭素の量 (出力) の差により決まるので、条件によって増える可能性も減る可能性もある (図1)。以下に、どのような条件で増え、どのような条件で減るのか、土壌炭素の増減に影響を与える主要な因子について解説する。

入力側の因子としては、まず、当然であるが投入される有機物の量があげられる。自然植生下では植物体の枯死量がこれに相当するが、地上部の落葉、落枝だけではなく、地下部の根の枯死分や、根から分泌される浸出有機物なども含まれる。農地では、地上部と地下部の成長量から収穫物など圃場外への持ち出し分を除いたものと、堆肥などの

図1 土壌を中心とした炭素循環と炭素の存在量

有機資材として投入される分の合計となる。投入量の次には、投入有機物の質、つまり分解しやすさの程度が挙げられる。例えば、有機物のC/N比（炭素と窒素の比）が大きいほど（つまり窒素に対して炭素の比率が大きいほど）土壌中での分解は遅く、また、有機物がリグニン、セルロースなどの難分解性の成分を多く含むほど分解が遅くなることなどが知られている。つまり、量だけではなく、有機物の質も重要ということになる。

一方、出力側の因子としては、まず、温度、土壌水分などの環境条件が挙げられる。例えば、温度が高くなれば、土壌有機物の分解速度が大きくなる。水分では、一般に、土壌が乾燥しすぎていても湿り過ぎていても有機物の分解速度が遅くなることが知られている。また、土壌の基本的な理化学性も有機物分解に影響を与える。例えば土壌の粒径組成では、一般に粘土質の土壌では砂質の土壌に比べて有機炭素含量が高いが、これは、微細な粒子である粘土が腐植と結合することにより有機物が安定化し、微生物による分解を受けにくくなるためと考えられている。pHが極端に低い、あるいは高い土壌では微生物の活動が抑制されるため、有機物の分解が遅くなる。さらに、耕起、不耕起などの人間による土壌管理方法の因子も挙げられる。例えば、耕起することにより地上に落ちた作物残渣や土壌中に存在する根、投入された堆肥などの有機物資材が土壌とよく混合されるため、耕起は土壌有機物分解を速める効果があるとされている。

土壌炭素量は、地球温暖化などの自然的環境条件の変化によっても、土地利用変化や農法の変化などの人為的要因によっても変化するが、いずれも上記の因子により説明が可能である。例えば、水田では稲作期間中に湛水（水田に水を張った状態）条件下におかれることで、有機物の分解速度が遅くなるため、気象や土壌の母材など他の条件が同じ場合は、畑よりも土壌炭素含量が高い。これは上記の因子のうち、主に土壌水分因子で説明できる。また、一般に、森林、草地などの自然植生に比べて、農地では、土壌炭素含量が低い。これは、農地では耕起により分解が速まることと、土壌に対する炭素の投入量が一般に森林や草地に比

べて少ないことで説明できる。

土壤炭素を増加させる農地管理の例について、上述した土壤炭素増減のメカニズムと関連付けながら以下に例示する。土壤への炭素の投入を増加させる例としては、堆肥や緑肥の施用が挙げられる。図2は、その実例で、英国のローザムステッド農業試験場における世界的に有名な長期連用試験のデータである (Coleman et al., 1996)。気候や土壤などの環境条件が同じ場所に設置された管理が異なる処理区間の比較をすると、化学肥料に比べて堆肥を施用した場合に土壤炭素量が多めに推移していることがわかる。これは、単純に、炭素の投入量が多いことにより土壤炭素が多くなったと理解できる。類似のものとして、堆肥以外にも、緑肥やカバークロップを作付けてそれをすき込んだり、多毛作によりすきこまれる残渣量を増やしたり、残渣の発生量が多い品目を選んだり、といった管理が挙げられる (Ding et al., 2006)。一方、投入を増やすのではなく、分解を遅くする管理の例としては、不耕起や省耕起栽培、すなわち、耕起による土壤のかく乱を少なくすることにより土壤中の有機物分解を遅らせる管理法が代表的である (Smith et al., 1998; Manley et al., 2005)。ただし、最近では、不耕起は必ずしも土壤炭素を増加させないとのデータも出されている (Blanco-Canqui et al., 2008; Angers et al., 2008; West et al., 2002)。

土壤をめぐる炭素動態のメカニズムを理解することにより、上記のようないくつかの農地管理法が土壤炭素の増加すなわち気候変動の緩和に有効であることが定性的には理解できる。しかし、その効果すなわち土壤炭素の増加量を定量的に示すのは簡単ではない。なぜなら、同じ農法を適用した場合の効果は、前述した多数の因子に影響されるため、場所ごとに異なるからである。

3. 土壤炭素動態のモデル化と広域評価

例えば、ある農地である量の堆肥を毎年施用した場合、土壤炭素が何年後にどの程度増加するのか、どのようにしたら予測できるだろうか。最も確実なのは、その場所で実

際に堆肥を毎年投入する実験を行うことである。たとえば堆肥を10アールあたりそれぞれ1トン、3トン、5トン投入する処理区を設けて土壤炭素を毎年測定する、という試験を行えば、同じ畑で堆肥を10アールあたり2トンや4トン投入した場合については、内挿によりかなり精度よく予測できるだろう。しかし、隣の町にある別の農地で同じ結果になるかどうかは、やってみないとわからない。また、同じ場所でも、作る作物を変えたら？耕し方を変えたら？堆肥の種類を変えたら？など、違う条件でどうなるかは、この試験だけではわからないので、該当する条件で新たに試験を行う必要が出てくる。さらに、土壤炭素の変動は一般にゆっくり起こるため、変動を実測により検出するには長期間の観測が必要である。つまり、土壤の炭素動態に影響する気候、土壤、農法などの組み合わせは多数になり、想定される全ての組み合わせ条件下で長期の圃場試験を行うのは事実上不可能ということになる。

そこで、「モデル化」という手法が有効になる。つまり、全て実測しようとするのではなく、今までに圃場試験のデータなどから得られた結果から土壤中での有機物の集積・分解過程に関わる主要な因子（たとえば温度、水分、粘土含量、農法など）についての法則を導き出して一般化し、数式であらわした土壤炭素動態モデルを構築し、それを活用することによって未知の場所における土壤炭素蓄積量の変動を予測するというものである。

世界では多数の土壤炭素動態モデルが提案されており (例えば、McGill (1996) によるレビュー)、さまざまに活用されている。しかし、モデルのほとんどは欧米諸国で開発されたもので、高緯度の温帯地域にその適用例が偏っており、熱帯地域や、日本を含むアジアにおいてはモデルの開発も、既存のモデルの検証も遅れていた。欧米とは気象条件が異なり水田や黒ボク土など欧米とは異なる土壤が重要な日本やアジアにおいて精度良く適用できるモデルが求められていたため、日本の長期連用試験のデータを使ってモデルを検証、改良するという研究を行ってきた。その結果、英国で開発されたローザムステッド・カーボン・モデル (Rothamsted Carbon Model: RothC; Coleman et al., 1996) (図3) について、日本の農耕地の半分を占める水田土壌と、畑の半分を占める黒ボク土では、モデルの改良が必要となり、黒ボク土以外の畑土壌では改良なしで使えることが明らかとなった (白戸, 2006)。

このようにモデルを現実のデータで検証し、必要に応じて改良することによって、予測結果の信頼性が大きく向上し、人間が土壤管理を変えた場合や、温暖化が進んで気候が変化した場合に土壤炭素の蓄積量がどう変化するか、精度良く予測することが可能になる (図4)。

次に、こうして検証したモデルを活用して、日本全国の

図2 英国ローザムステッド試験場における管理の違いが土壤炭素量に及ぼす影響

図3 ローザムステッド・カーボン・モデル(RothC)の概要

図4 水田におけるRothCの検証・改良および将来予測の例

土壌炭素の蓄積ポテンシャルを試算した結果を紹介する。Yokozawa et al. (2010) は、RothCを日本の全農耕地に1km解像度で適用することにより、有機物の投入量増加による農地土壌の炭素蓄積効果を推定した。各1kmメッシュにおける1990年の土壌炭素量を初期値とし、A（最低限の有機物投入シナリオ）、B（堆肥シナリオ：堆肥として全ての水田に1.0 tC ha⁻¹ 年⁻¹、水田以外の農地に1.5 tC ha⁻¹ 年⁻¹を投入）、C（水田二毛作シナリオ：現在の水田がすべて水稲単作と仮定したうえで、全ての水田で裏作に麦を作付し、麦の残渣として0.7 tC ha⁻¹ 年⁻¹を投入）、D（BとCの両方を実施）の4つのシナリオについて、土壌炭素量の変化を25年間計算した。これら4つのシナリオにおける土壌への炭素投入量は、1990年の土壌炭素量を維持するのに必要な炭素投入量よりも小さいため、25年後には土壌炭素は4つのシナリオ全てにおいて減少したが、各シナリオの炭素投入量の違いにより減少の程度は異なり、シナリオAの減少が最も大きかった。そこで、B～DシナリオとAとの差を、B～Dシナリオにおける土壌炭素蓄積効果とすると、その規模は25年間でそれぞれ32、11、43MtCであった（図5）。これを単位面積当たり、1年あたりの土壌炭素蓄積量でみると、25年間の平均で、B～Dシナリオがそれぞれ0.30、0.10、0.41tC ha⁻¹ 年⁻¹で、これ

25年間の土壌炭素蓄積効果(MtC)			
	水田	畑	合計
堆肥	18	14	32
水田二毛作	11	-	11
堆肥+水田二毛作	29	14	43

図5 全国の農地における農地管理による土壌炭素蓄積効果の試算

らの値は既往の研究例（Smith et al., 2007）と類似の値であった。RothCモデルと土壌の空間的分布データを結びつけるこのシステムは、日本の農耕地土壌における有機物投入量の増加による土壌炭素の蓄積効果を見積もるのに有効であるが、より現実的な推定を行うためには、より現実的で実行可能なシナリオの策定が必要であると考えられ、現在、研究が進行中である。

4. 総合評価の重要性とLCA

土壌炭素が増減するメカニズムを理解し、ある管理技術の効果を定量的に予測できたとしても、その技術を導入する前に、以下のような注意すべき点がある。1つめは、他の温室効果ガスとのトレードオフである。有機物の投入量を増やした時に、土壌炭素が増加したとしても、有機物の投入は一酸化二窒素（N₂O）の発生も増加させる可能性があり、水田においては、さらにメタン（CH₄）の増加も考慮しなければならない。これら3つの温室効果ガス、すなわちCO₂、CH₄、N₂Oは、それぞれのガスの地球温暖化係数（Global Warming Potential: GWP）を考慮して、純netGWPに換算して比較できるので、そのような評価が必要となる。例えば、北海道の畑作地帯（Mu et al., 2006）、北海道の泥炭地（永田, 2006）、インドネシアの泥炭地（Hadi et al., 2005）などで、そのような総合評価が行われている。また、Nishimura et al. (2005) は、3つのガスを同時に連続測定するモニタリングシステムを開発した。このようなシステムを用いた観測データの蓄積が、3つのガスの総合評価のために重要となる。

2つめは、まさにこの学会が取り組んでいるLCA（Life Cycle Assessment）の導入である。例えば、「堆肥の施用」を例にとると、土壌の炭素が増加するとしても、堆肥の製造や運搬、散布などに土壌への炭素蓄積効果以上のCO₂排

出があっては意味がない。そこで、LCAにより、「全体としてどうなのか」を評価することが有効になる。農業分野でもこの手法への期待が高まっているが、評価の例は、まだ少数である。例えば、北海道の十勝の畑作の事例（古賀ら, 2006）では、耕起や施肥などの農法を変えた場合の土壌炭素の増減と農作業による機械からのCO₂排出などを総合的に評価し、トラクタ作業や収穫物の乾燥など圃場外の化石燃料の燃焼に由来するCO₂排出量は土壌炭素の分解によって発生するCO₂に比べてはるかに小さいとの結果が出ている。一方、秋田県の八郎潟干拓地における水稲作の事例（Harada et al., 2007）では、不耕起栽培において慣行と比べて化石燃料の消費によるCO₂排出とCH₄排出が減少し、土壌炭素の違いは無く、総合的には不耕起栽培によって温室効果ガスの排出を減らすことができると報告されている。今後は、このような解析の事例を増やすことにより、「全体としてどうなのか」を知った上で営農管理方法を選択することができるようになることが望まれる。

3つめは、他の環境負荷とのトレードオフである。例えば、有機物の投入増加は、硝酸性窒素による地下水汚染や閉鎖性水域での富栄養化などを引き起こす場合もある。また、都市ゴミコンポストなどには重金属など有害物質が付加されるなどの問題もある。同じ温室効果ガス同士であれば、上述したように純netGWPを用いることでひとつの物差しで総合評価が可能となるが、異なる種類の環境負荷を比較し、総合的に評価するには、評価手法の開発自体も大きな研究課題となる。この面での研究の発展が今後期待される。

4つめは、農業生産とのバランスである。例えば、新鮮な、あるいは未熟な有機物の大量施用は、作物が窒素飢餓を起こしたり、土壌の還元化により有害になる場合や、病害の発生の危険もある。そもそも、土壌炭素は、農業、あるいは作物生産にとってどのような意味があるだろうか。炭素は植物の必須元素16種類に含まれているが、植物は大気中の二酸化炭素を光合成により固定するのであり、土壌中の炭素を吸収するわけではない。つまり、土壌有機炭素は、植物にとっては直接吸収する対象ではない。土壌中の有機炭素は、植物遺体などの粗大有機物が微生物に分解され、土壌に固有の腐植物質に変化するまでのさまざまな段階の有機物として存在している。これらの有機物は、さまざまな機能を発揮して植物生産、つまり農業に役立っている。この機能は、大きく3つに分けて考えることができる。

- 1) 物理的性質の向上：土壌有機物は土壌の団粒形成を促進するため、保水性、透水性、通気性が高まり、根の成長に良い環境を形成し、耕うんを容易にし、水食や風食などの土壌侵食も軽減する。
- 2) 化学的性質の向上：土壌有機物は、微生物による分解の過程で、必須元素、特に窒素、リン、カリ、硫黄などを

供給する。供給は徐々に行われるため過剰の施用による害や溶脱による損失が少なく、微量要素も含めてバランスよく供給されるため、特定元素の欠乏も起こりにくい。また、腐植物質はマイナスやプラスの荷電をもった吸着部位を多量に持つため、土壌中の陽イオンや陰イオンを保持し、作物に有用な元素を徐々に作物に供給する一方、植物に有害な元素を吸着し、植物への吸収を抑制して保護する。さらに、pHに対して緩衝作用があるため、pHの急激な変化を抑制して植物を保護する。また、たとえば、火山灰土壌などリン酸吸収の大きい土壌においてリン酸の不可給化を抑制しリン酸の効果を高めるなど、粘土鉱物に吸着されやすい物質の直接的接触を避けて、植物の吸収を円滑にする効果もある。

3) 生物学的性質の向上：土壌有機物は土壌中の豊富で多様な微生物群の栄養源として貢献し、これら微生物群は、植物養分の供給だけでなく、病原菌との拮抗作用により病害の抑制ももたらす。

このように、土壌有機物は多様な機能を発揮するため、一般的に土壌有機物の含量を高く保つことは、さまざまな意味で土壌の肥沃度向上に役立つ。そのため、古来、農業には有機物含量の維持増進のため堆きゅう肥の施用が不可欠なものであった。本稿で述べてきたように、近年の地球温暖化問題で土壌有機炭素自体が二酸化炭素の吸収源とも排出源ともなりうるということが知られてきたため、どうすればより多くの炭素を土壌中に蓄積させることができるか、という視点の研究がなされているが、それはあくまで最近の話で、長い農業の歴史における土壌有機物の意義に比べれば、温暖化緩和に役立つという新たな土壌炭素の意義は、おまけのようなものと言える。

農地の土壌有機物含量の維持増進には温暖化防止や土壌の肥沃度増進の意味があるが、多量に投入すると問題を引き起こす場合があることも理解し、土壌を単に有機物蓄積の場と考えるのではなく、持続的に農業生産を行うための適切な施用を行うことが必要である。地球温暖化問題との関連で土壌炭素の蓄積が注目を浴びている今、改めて、農業生産を支えている貴重な資源である土壌についての認識が広まることを期待している。

（平成22年11月12日受付）

参考文献

- Angers D. A., Ericksen-Hamel N. S. (2008): Full-inversion tillage and organic carbon distribution in soil profiles: A meta-analysis. *Soil Science Society of America Journal*, 72, 1370-1374
- Blanco-Canqui H., Lal R. (2008): No-tillage and soil-profile carbon sequestration: An on-farm assessment.

- Soil Science Society of America Journal, 72, 693-701
- Coleman K., Jenkinson D. S. (1996): RothC-26.3-A model for the turnover of carbon in soil. In: Evaluation of Soil Organic matter Models, Springer-Verlag, Berlin, 237-246
- Ding G., Liu X., Herbert S., Novak J., Amarasiriwardena D., Xing B. (2006): Effect of cover crop management on soil organic matter, *Geoderma*, 130, 229-239
- Hadi A., Inubushi K., Furukawa Y., Purnomo E., Rasmadi M., Tsuruta H. (2005): Greenhouse gas emissions from tropical peatlands of Kalimantan, Indonesia, *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 71, 73-80
- 袴田共之, 波多野隆介, 木村真人, 高橋正通, 坂本一憲 (2000): 地球温暖化ガスの土壌生態系との関わり 1. 二酸化炭素と陸域生態系, *日本土壌肥科学雑誌*, 71, 263-274
- Harada H., Kobayashi H., Shindo H. (2007): Reduction in greenhouse gas emissions by no-tilling rice cultivation in Hachirogata polder, northern Japan: Life-cycle inventory analysis, *Soil Science and Plant Nutrition*, 53, 668-677
- IPCC, 2007: Summary for Policymakers. In: *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Solomon, S., D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor and H.L. Miller (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 18pp.
- 伊藤昭彦 (2002): 陸上生態系機能としての土壌有機炭素貯留とグローバル炭素循環 *日本生態学会誌*, 52, 189-227
- 古賀伸久, 鶴田治雄 (2006): 北海道の畑作農業から発生する温室効果ガスのライフサイクルインベントリ分析, *農業および園芸*, 81, 1101-1109
- Lal R. (2004): Soil carbon sequestration impacts on global climate change and food security, *Science*, 304, 1623-1627
- Manley J., Van Kooten G. C., Moeltner K., Johnson D. W. (2005): Creating carbon offsets in agriculture through no-till cultivation: A meta-analysis of costs and carbon benefits, *Climatic Change*, 68, 41-65
- McGill, W. B. (1996): Review and classification of ten soil organic matter (SOM) models. In: *Evaluation of Soil Organic Matter Models*, Springer-Verlag Berlin, 111-132.
- Mu Z., Kimura S. D., Hatano R. (2006): Estimation of global warming potential from upland cropping systems in central Hokkaido, Japan, *Soil Science and Plant Nutrition*, 52, 371-377
- 永田修 (2006): 泥炭地・湿原における温室効果ガス, 土壌の物理性, 104, 85-95
- Nishimura S., Sudo S., Akiyama H., Yonemura S., Yagi K., Tsuruta H. (2005): Development of a system for simultaneous and continuous measurement of carbon dioxide, methane and nitrous oxide fluxes from croplands based on the automated closed chamber method, *Soil Science and Plant Nutrition*, 51, 557-564
- Paustian K., Andren O., Janzen H. H., Lal R., Smith P., Tian G., Tiessen H., Van Noordwijk M., Woomer P. L. (1997): Agricultural soils as a sink to mitigate CO₂ emissions, *Soil Use and Management*, 13, 230-244
- 白戸康人 (2006): 日本およびタイの農耕地における土壌有機物動態モデルの検証と改良, *農業環境技術研究所報告*, 24, 23-94
- Smith P., Martino Z., Cai Z., Gway D., Janzen H., Kumar P., McCarl B., Ogle S., O'Mara F., Rice C., Scholes B., Sirotenko O. (2007): Agriculture. In: *Climate Change 2007: Mitigation. Contribution of Working Group III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Cambridge University Press Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 497-540
- Smith P., Powlson D. S., Glending M. J., Smith J. (1998): Preliminary estimates of the potential for carbon mitigation in European soils through no-till farming, *Global Change Biology*, 4, 679-685
- 田村憲司 (1996): 地球規模の炭素循環 陸上生態系における土壌有機炭素の動態, *環境科学会誌*, 9, 547-554
- West T. O., Post W. M. (2002): Soil organic carbon sequestration rates by tillage and crop rotation: A global data analysis. *Soil Science Society of America Journal*, 66, 1930-1946
- Yokozawa M., Shirato Y., Sakamoto T., Yonemura S., Nakai M., 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*, 56, 168-176