

家畜ふん堆肥等の有機物施用による土壌の炭素貯留

～地力の維持増進と地球温暖化緩和の両立を目指して～

国立研究開発法人 農業・食品産業技術総合研究機構(農研機構)

農業環境変動研究センター

気候変動対応研究領域

土壌炭素窒素モデリングユニット長

白戸 康人

1. 気候変動の進行と緩和の必要性

(1) 温室効果ガス濃度の増加

急速な人間活動の増大により、大気中の二酸化炭素(CO₂)、メタン(CH₄)、一酸化二窒素(N₂O:亜酸化窒素)などの温室効果ガスの濃度が増加し、地球温暖化が進行している。IPCC(Intergovernmental Panel on Climate Change:気候変動に関する政府間パネル)が2013年に発行した第5次評価報告書⁶⁾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、95%以上の確率で人為起源である」と断定した。これは、それ以前の報告よりもより強い表現であり、人為による気候変動の進行は、もはや疑いようのない状況であると言える。

(2) 温暖化への適応と緩和

実際に温暖化の影響は各方面に出始めているため、温暖化への「適応策」を進めることが急がれている。各分野とも、このままでは温暖化の影響を受けて被害や損害を受ける可能性があるわけであるから、当然の動きである。日本政府も2015

年に国として「気候変動の影響への適応計画」を策定した。このように、最近では温暖化のもととなる温室効果ガスを削減する、「緩和策」よりも「適応策」が重視されつつあるようにも見える。

農業の現場では「適応」の重要性が高いことは当然であるし、そこは着実に進める必要があることは言うまでもない。しかし、日本のようないわゆる先進国ではとくに、「緩和策」にも力を入れることが、これまで温室効果ガスを排出してきた国家としての責任であることも忘れてはならない。皆が適応に精いっぱいとなり、緩和にまで手が回らないとなれば、気候変動の加速は止まらないことになるからだ。

(3) 農業分野の寄与

緩和には、省エネなどで化石燃料の消費を抑制することが第一である。工業国である我が国では農業よりは工業などの分野の寄与が大きく、例えば、2014年の日本の温室効果ガスの総排出量に占める農業分野の寄与はわずか3%程度にすぎ

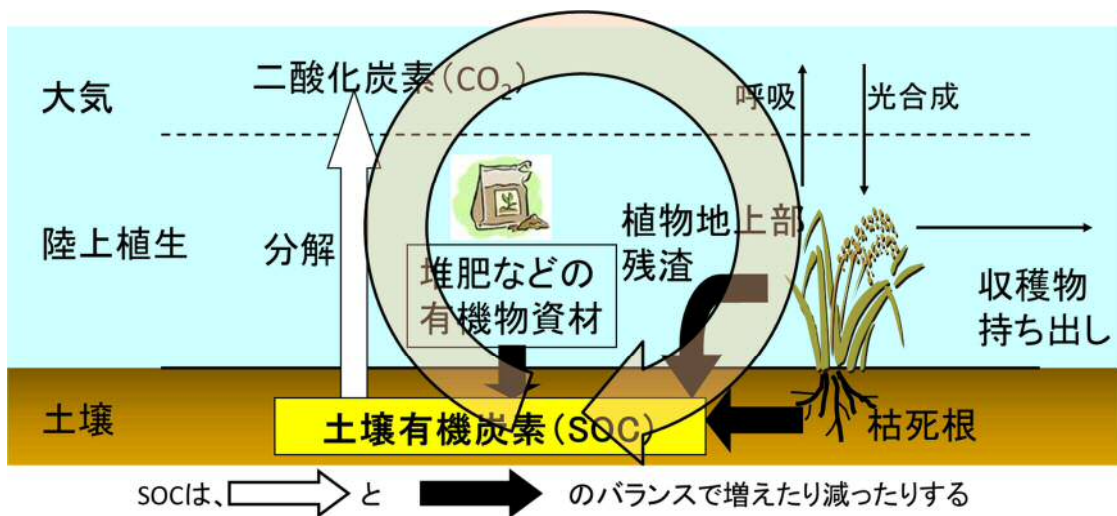


図1 土壌を中心とした炭素の循環
 (炭素は二酸化炭素、植物体、土壌有機物と姿を変えながら循環しており、土壌炭素が増えることは、大気CO₂の減少を意味する。)

ない⁸⁾。しかしながら、世界で見ると、農業、林業など「土地」分野の寄与は大きく、最新の見積もりでは24%とされている⁶⁾。温室効果ガスの排出は、化石燃料の消費だけではないのである。

したがって、地球全体のことを考えれば、農業や土地セクターにおける温室効果ガス排出削減の必要性は大きい。また、わが国と類似の自然条件下で水田農業を営むようなモンスーンアジアにおいては、日本で開発された温暖化緩和策をひろく普及できる可能性も大きいという、拡張性、普及可能性が大きいという側面もある。

2. 土壌の炭素貯留と温暖化緩和の関係

(1) 土壌の炭素循環

土壌呼吸という用語があるように、土壌の表面からはCO₂が放出されている。

一部は生きている植物の根による呼吸であり、一部は土壌有機物の微生物による分解によって発生している。この土壌有機物は、もともと植物が光合成により固定した炭素(C)が主成分である。農地では、植物が光合成をしてCO₂を吸収し、その植物が遺体となって土壌に還元され、それが土壌中の微生物により分解されてCO₂が大気に出る、というように、大気、植物、土壌の間でCの循環が行われている(図1)。したがって、土壌中に有機物として存在する土壌炭素量が減少するならば農地はCO₂を排出しており、増加ならばCO₂を吸収している勘定になる。

(2) 土壌の炭素貯留の意義

概して土壌中に炭素が多い方がその土壌の肥沃土が高いといえるため、多くの場合、土壌炭素を増やすような管理は、地力の維持増進という観点からも重要であるといえることができる。つまり、土壌

炭素を増やすことによる CO₂ の吸収、すなわち温暖化の緩和と、地力の維持増進による農地の生産力向上は、いわゆる Win-win の関係にあるといえる。農地はあくまで農業生産のためであるが、その農地を維持するための活動が、別の角度から光をあててみると温暖化緩和にも役立っているのだ、と理解することができる。

世界の中では、日本のように資材を多投入する農業が行われていてそれに起因する環境負荷が問題になる国はむしろ少なく、土壌有機物の消耗や低肥沃度が問題になっている土地が大半であることを考えると、この、持続的な農業生産と地球温暖化の緩和を両立できる土壌炭素の貯留は、大いに注目されるべき方策だといえる。

3. 土壌の炭素貯留のポテンシャルは大きい

(1) 土壌炭素の総量

地球全体の土壌炭素量の推定値には幅があるが^{7, 19)}、世界の土壌炭素の総量は、大気 CO₂ の総量の 2 倍、陸上植生のバイオマス総量の 3 倍という数字がよく引用されるように、土壌中の炭素量は地球全体で見れば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。また、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^{5, 9)}。

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。時間のスケールが異なるため(化石燃料消費は 150 年余り、先史時代から今までは 10,000 年)注意が必要ではあるが、実際に化石燃料消費の 2 倍近い多量の炭素が土地から大気に放出されてきたというのは大きな事実である。

(2) 炭素貯留ポテンシャル

このことは、逆に、適切な管理の下で劣化した土壌が修復されれば、土壌に炭素を貯留させることによって、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、すべての農地を太古の昔のような自然植生に戻すことによって、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って、土壌中の炭素を増加させるのは、ある程度まで可能であると考えられる。実際に土壌炭素を増加させることによって、地球全体の農地では、炭素貯留による地球温暖化緩和の可能性がどの程度まであるか、さまざまな推計がなされている。たとえば、Paustian ら¹²⁾では、20~30 PgC、Lal⁹⁾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(55~78 PgC)の 50~66%程度と推計されているが、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。土壌の炭素貯留の可能性は大きい。

注：1 Pg は 1 ペタグラムと読み、千兆グラムのことである。1 Pg は十億トンを意味するので、文中の 20~30 PgC は 200~300 億トンの膨大な炭素(C)量を示している。

4. 土壌炭素量増減のメカニズムと、人間の管理で変えられること

(1) 投入される炭素

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)」の差によって決まるので、条件次第で増減、いずれの可能性もある(図1)。以下に、その条件であ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挙げられる。自然植生下では、植物体の枯死量がこれに相当するが、地上部の落葉や落枝だけではなく、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。

たとえば、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、有機物がリグニンや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。

(2) 出て行く炭素

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。たとえば、温度が高くなれば、土壌有機物の分解が速くなる。土壌の水分条件では、一般に、土壌が乾燥しすぎていても湿りすぎていても、有機物の分解

が遅くなり、微生物が有機物を分解するのにちょうど良い土壌水分状態があ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の分解に影響を与える。たとえば、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って、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、耕起や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。たとえば、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を、土壌とよく混合する耕起は、土壌有機物の分解を速める効果があるといわれている。

(3) 農地の炭素増減

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。たとえば、水田では稲作期間中に湛水(水田に水を張った状態)条件下に置かれることによって、有機物の分解が遅くなるため、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、土壌水分因子で説明できる。また、一般に、森林や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。

(4) 土壌炭素の増加策

土壌炭素量を増加させるためには、土壌にすき込む有機物(堆肥や緑肥など)の量を増やす管理、および、不耕起栽培に切り替えるなどして土壌有機物の分解を遅くする管理が有効である¹⁷⁾。図2は、その実例で、世界で最も古い長期連用試験(同じ畑で長期間継続した試験)として有名な英国のローザムステッド試験場のデータで、堆肥を施用した畑では時に土壌炭素が増加し続けていることを示して

いる³⁾。気候や土壌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、土壌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って、土壌炭素量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、多毛作によって、すき込まれる残渣量を増やしたり、残渣の発生量が多い作目を選んだり、といった農地管理方法が挙げられる⁴⁾。

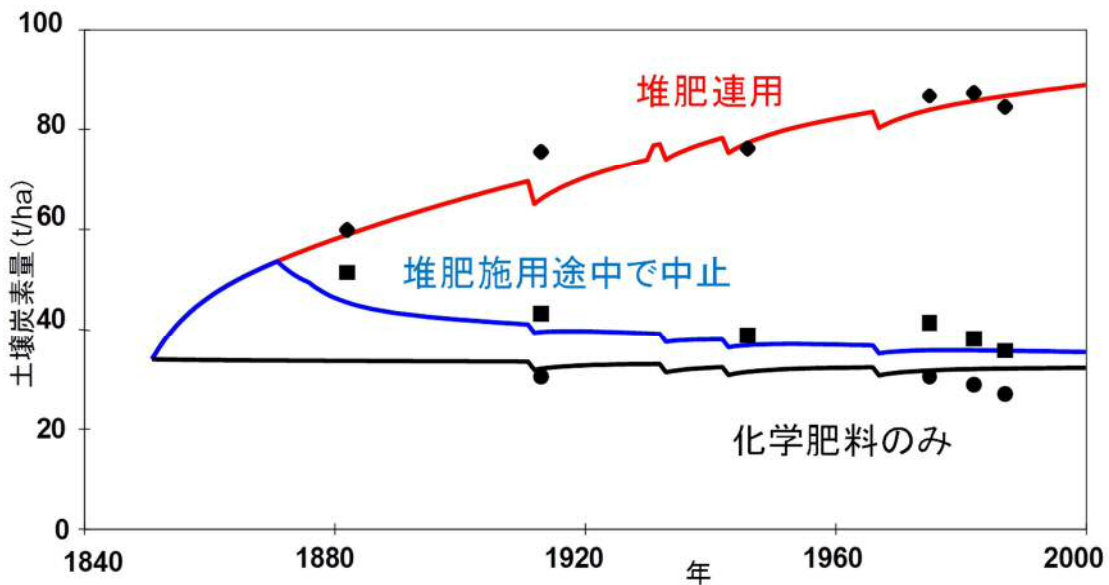


図2 英国ローザムステッド農業試験場の有名な長期連用試験の結果(土壌炭素は、堆肥の施用で増加し、化学肥料のみでは横ばいになっている。Coleman and Jenkinson の文献³⁾を改変。)

(5) 堆肥の施用と土壌炭素

堆肥の施用は、有機資源の有効利用という意義もある。特に日本のような家畜排泄物が多量に存在する状況ではその意義が大きい。ただしその際、適正な施用

量を超えて多量に施用すると、水質汚染や他の温室効果ガス(メタン、一酸化二窒素)などの発生、場合によっては土壌中の養分の偏りや重金属汚染などの様々な問題を招くことがあるので注意が必要

である。

また、もともと焼却などで廃棄していた排泄物を堆肥化に回して有効利用する場合には、それによって増加した農地土壌の炭素量を CO₂ の吸収としてカウントすることができるが、例えば、ある場所に堆肥を施用したことにより土壌炭素が増加した場合でも、その堆肥がそれ以前に別の場所で土壌に施用していたものだとすると、堆肥の施用場所が移動しただけで、大気 CO₂ を吸収したと考えることはできない。

このように、堆肥の施用には、「単なる堆肥の移動」になって CO₂ を吸収したとはみなされる場合があるので注意が必要である。これに対して緑肥やカバークロップの場合は、その場所で確かに大気 CO₂ を吸収して光合成を行うので、このような問題は考えなくてよい。

一方、投入を増やすのではなく、分解を遅くする農地管理方法の例としては、不耕起や省耕起栽培、すなわち、耕起による土壌のかく乱を少なくすることによって、土壌中の有機物の分解を遅らせる管理方法が代表的である^{10, 18)}。ただし、最近では、不耕起は必ずしも土壌炭素を増加させないとのデータも出されている^{1, 2, 20)}。

(6) 農地管理と炭素貯留

以上のように、土壌をめぐる炭素動態のメカニズムを理解することにより、上記のような農地管理方法が土壌炭素の増加、すなわち地球温暖化の緩和に有効であることが理解できる。また、気候条件など人間にはコントロールできないことと、農地の有機物管理などコントロール

できることの区別もつき、どのような管理が土壌の炭素貯留に有効なのかが理解できる。

ただし、有効性を定性的に理解できても、その効果すなわち土壌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、同じ農地管理方法を適用した場合でも、その効果は、前述した多数の因子に影響されるため、場所ごとに異なってくるからである。

5. 土壌炭素動態のモデル化と将来予測や広域評価

(1) 炭素動態のモデル化

たとえば、ある農地である量の堆肥を毎年施用した場合、土壌炭素が何年後に、どの程度まで増加するのか、どのようにしたら予測できるだろうか。もっとも確実なのは、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。しかし、土壌炭素の変動は一般に緩慢なため、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。また、土壌炭素動態に影響する気候や土壌や農地管理方法などの組み合わせは多数になり、想定されるすべての組み合わせ条件下で、長期の圃場試験を行うのは不可能である。

そこで、「モデル化」という手法が有効になる。つまり、すべ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、土壌中の有機物の集積・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、農地管理方法など)に関する法則を導き出して一般化し、数式であらわした土壌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壌炭素量の変動を予測するというものである。

(2) モデルの活用と改良

世界では多数の土壌炭素動態モデルが提案されていて¹¹⁾、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いて、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、さらに水田や黒ボク土など欧米とは異なる

土壌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、イギリス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）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壌では、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（図 3）¹³⁾。

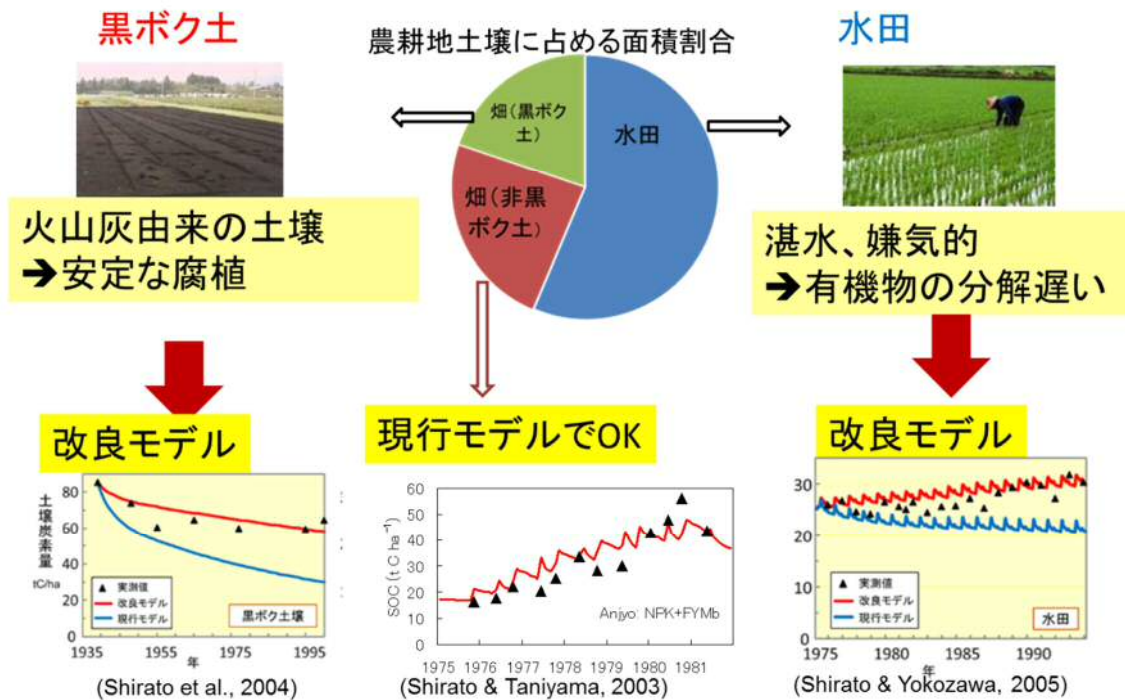


図 3 RothC モデルの日本における検証と改良

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、人間が土壌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、土壌炭素量がどのように変化するか、精度良く予測することが可能になった（図 4）。こうして検証した RothC モデルを活用して、

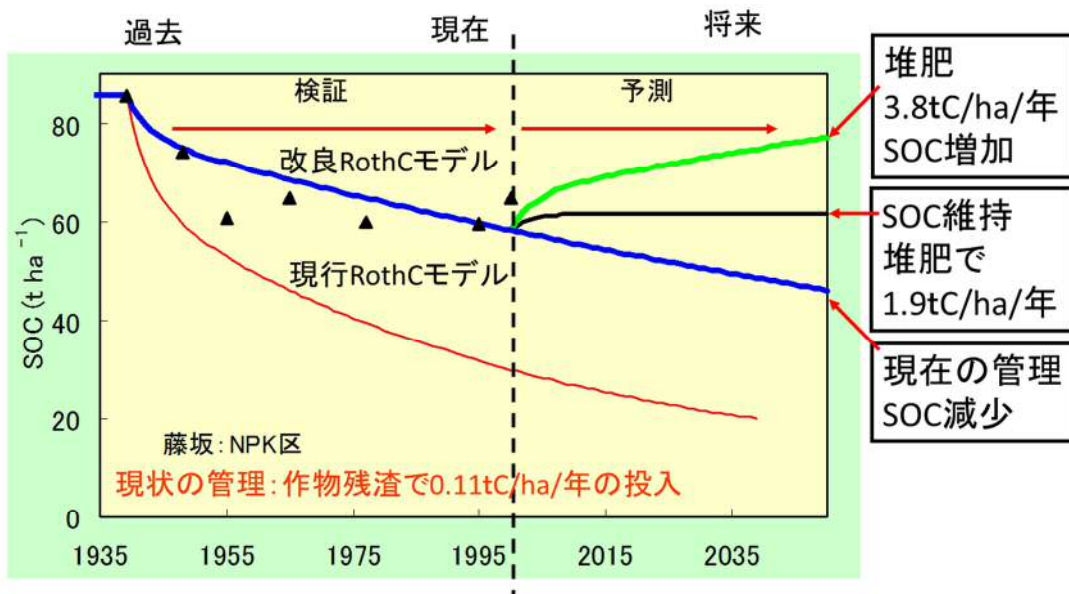


図4 モデルの検証と改良（過去から現在）に基づく将来予測の例（このままの管理だと土壤炭素（SOC）量が減少すること、今のSOCレベルを維持するには堆肥の施用が1.9tC/ha/年必要であることなどが予測できる。）

日本全国の土壤炭素の貯留ポテンシャルを推計する研究が進められていて、2015年からは日本国温室効果ガスインベントリ報告書（NIR）に採用された⁸⁾。これにより、農地の有機物管理を改善する取り組みが国全体で進めば、国連への報告の数字にも、その影響は反映されることになる。

6. 有機物投入の注意点：

総合評価の重要性とLCA

(1) 土壤炭素と温室効果ガスのトレードオフ

土壤への炭素貯留は、地球温暖化緩和と農地の生産力の維持増進の両方を達成できる良い方策であるが、留意点もある。

ひとつは、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、土壤炭素が増加したとしても、有機物の投入は一酸化二窒素（ N_2O ）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（ CH_4 ）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 CO_2 、 CH_4 、 N_2O は、それぞれのガスの地球温暖化係数（GWP: Global Warming Potential）を考慮して、全て CO_2 に換算して合計して比較できるので、そのような評価が必要となる。

(2) 化石燃料消費

さらに、土壤から出入りする温室効果ガスだけでなく、農業機械や資材（肥料、農薬、プラスチックマルチなど）の製造過程における化石燃料消費に伴う CO_2 の排出も勘定に入れる必要がある。たとえ

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貯留効果以上のCO₂排出があっては意味がない。そこで、LCA(ライフサイクル・アセスメント)によって、「全体として、どうなのか」を評価することが有効になる。

(3) 環境負荷とのトレードオフ

また、他の環境負荷とのトレードオフにも留意する必要がある。たとえば、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、都市ゴミのコンポストなどには、重金属をはじめとする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GWPを用いることによって、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。

(4) 土壌炭素量の計算

前述した RothC モデルによる土壌炭素量の増減の計算を、web 上で簡単な操作で行えるツールを開発し、公開した(図5)。地図上の任意の地点をクリックすることでその場所の気象と土壌の情報が取得され、次に作物の種類と管理法をメニューから選ぶだけで、簡単に計算ができる。自分の農地でどんな管理をすれば何年後に土壌炭素がどれくらい増えるのか減るのか、簡単に試算できるので便利である。さらには、一酸化二窒素の発生量、水稲を選んだ場合のメタンの発生量、農業機械や資材に由来する化石燃料消費に伴うCO₂発生量も合わせて計算し、全てをGWPでCO₂換算して合計する機能も付いているので、自分の選んだ農法が総合的に見て地球温暖化にとってどうなのかを判断することもできる。このツールを活用して、自分の農産物の付加価値を高めるなどのために役立てていただけると幸いである。



図5 Web 上で簡単に土壌炭素の計算ができる土壌のCO₂吸収「見える化」サイト(地図をクリックし、作物と管理法をメニューから選ぶだけで簡単に計算ができる。)

7. 今後に向けて

(1) 地力の維持増進

これまで述べてきたように、近年の地球温暖化問題で土壌炭素自体が、CO₂の吸収源とも排出源ともなりうることが知られてきたため、どのようにすれば、より多くの炭素を土壌中に貯留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。しかし、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、いわば「おまけ」のようなものといえる。農地は本来、食料の生産のためにあるもので、本末転倒になってはいけないうる。あくまでも、本来の持続的な農業生産のための地力の維持増進が主たるべきである。

(2) 有機物管理へのインセンティブ

そのうえで、これらの有機物管理の取り組みが、より広範に普及するためには、取り組みにインセンティブを与える、多様な方法が考えられる。ひとつは、政府による環境直接支払いなどの補助金で、日本でも農林水産省が行っている。さらには、クレジット・オフセット制度(Jクレジット制度：経済産業省サイト：<http://japancredit.go.jp/>)も、現在のところ広がりには限られているが動き出している。また、最近では自治体レベルで独自に認証システムを持つエコラベル(たとえば、京都府亀岡の「クールベジ」<http://coolvege.com/index.html>)など、政府ではなく民間企業のCSR(社会貢献)活動とも結び付けたような、多様な取り組みが始まっている。海外では、もちろんクリーン開発

メカニズム(CDM: Clean Development Mechanism)の活用が考えられる。

(3) COP21の意義

2015年末に国連気候変動枠組条約(UNFCCC)第21回締約国会議(COP21)がパリで開催され、2020年以降の新たな枠組みである「パリ協定」が決定された。内容としては、世界共通の長期目標として温度上昇を2℃以内に抑えることを目標とすること、主要排出国を含むすべての国が削減目標を5年ごとに提出・更新することなどが合意された。問題点は多いにせよ、アメリカや中国のような大きな排出国が入っていなかった京都議定書の問題点を、すべての国が入ることで解決しようとした意義は大きい。今後の実行が期待される。

(4) 4-per-1000 イニシアティブ

また、このCOP21に合わせてホスト国のフランスが「4 per 1000 イニシアチブ」(<http://www.cirad.fr/en/news/all-news-items/articles/2015/questions-a/climate-and-food-security-4-per-1000>)というプロジェクトについて、正式に開始を表明した。プロジェクトの内容は、土壌の炭素貯留を促進させることによって、温暖化緩和と持続的農業生産の両方を達成することであり、毎年4パーミル(‰:千分の一)、すなわち0.4%ずつ土壌炭素量を増加させれば、化石燃料消費による大気中CO₂濃度の上昇を阻止できる、という計算に基づいている。わが国からも農林水産省が代表として幹部を送り込み、このプロジェクトへの賛同を表明している。今後、土壌の炭素貯留の話題が、再びホットになるかもしれない。

畜産農家にとって家畜排泄物はゴミかもしれないが、それを農地に適切なかたちで施用することは、資源の有効利用、地力の維持増進、温暖化の緩和など、いくつもの良いことを生み出す。ぜひ、誇りを持って取り組んでいただきたい。

引用文献 (著編者のアルファベット順)

- 1) Angers D. A., Ericksen-Hamel N. S.: Full-inversion tillage and organic carbon distribution in soil profiles: A meta-analysis (反転耕うんした土壌断面における有機炭素の分布状態: メタ解析) . *Soil Science Society of America Journal*, **72**, 1370-0374 (2008) .
- 2) Blanco-Canqui H., Lal R.: No-tillage and soil-profile carbon sequestration: An on-farm assessment (不耕起栽培の土壌炭素隔離の土壌断面全体としての評価) . *Soil Science Society of America Journal*, **72**, 693-701 (2008) .
- 3) Coleman, K. and Jenkinson, D. S. (1996) RothC-26.3 – A model for the turnover of carbon in soil. In: Evaluation of Soil Organic Matter Models. Using Existing Long-Term Datasets (土壌における炭素循環モデル: 長期連用試験データを用いた土壌有機物モデルの評価) , Ed DS Powlson, P Smith, and JU Smith, p. 237–246, Springer, Berlin.
- 4) Ding G., Liu X., Herbert S., Novak J., Amarasiriwardena D., Xing B.: Effect of cover crop management on soil organic matter (被覆作物管理が土壌有機物に与える効果) , *Geoderma*, **130**, 229-239 (2006) .
- 5) 袴田共之, 波多野隆介, 木村真人, 高橋正通, 坂本一憲: 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 (2000) .
- 6) IPCC (2013) Climate Change 2013 (気候変動 2013) : The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 1535 pp, doi:10.1017/CBO9781107415324.
- 7) 伊藤昭彦: 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 (2002) .
- 8) 国立環境研究所温室効果ガスインベントリオフィス編 (2016) 日本国温室効果ガスインベントリ報告書.
- 9) Lal R.: Soil carbon sequestration impacts on global climate change and food security (土壌の炭素隔離が地球気候変動と食糧確保に与える影響) , *Science*, **304**, 1623-1627 (2004) .
- 10) Manley J., Van Kooten G. C., Moeltner K., Johnson D. W.: Creating carbon offsets in agriculture through no-till cultivation: A meta-analysis of costs and carbon benefits (不耕起栽培によるカーボンオフセット: コストと炭素便益のメタ解析) , *Climatic Change*, **68**, 41-65 (2005) .
- 11) McGill, W. B.: Review and classification of

- ten soil organic matter (SOM) models (10件の土壌有機物(SOM)モデルの再検討と分類). In: Evaluation of Soil Organic Matter Models, Springer-Verlag Berlin, pp. 111-132. (1996).
- 12) Paustian K., Andren O., Janzen H. H., Lal R., Smith P., Tian G., Tiessen H., Van Noordwijk M., Woomer P. L.: Agricultural soils as a sink to mitigate CO₂ emissions (二酸化炭素の排出を低減するための吸収源となる農業用土壌), *Soil Use and Management*, **13**, 230-244 (1997).
- 13) 白戸康人: 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 (2006)
- 14) Shirato, Y. and I. Taniyama: Testing the suitability of the Rothamsted carbon model for long-term experiments on Japanese non-volcanic upland soils (日本の非黒ボク土畑土壌における長期連用試験を用いたローザムステッド・カーボン・モデルの検証). *Soil Sci. Plant Nutr.*, **49**, 921-925 (2003).
- 15) Shirato, Y., T. Hakamata and I. Taniyama: Modified Rothamsted carbon model for Andosols and its validation: Changing humus decomposition rate constant with pyrophosphate-extractable Al (黒ボク土に適用可能な改良ローザムステッド・カーボン・モデルとその検証: ピロリン酸塩可溶アルミニウム含量に応じて腐植成分の分解率を変えることによる改良). *Soil Sci. Plant Nutr.*, **50**, 149-158 (2004).
- 16) Shirato, Y. and Yokozawa, M.: Applying the Rothamsted Carbon Model for long-term experiments on Japanese paddy soils and modifying it by simple tuning of the decomposition rate (日本の長期連用水田土壌への RothC の適用と簡単な分解率の調整による改良). *Soil Science and Plant Nutrition*, **51**, 405-415 (2005).
- 17) Smith P., Martino Z.: Agriculture. In: Climate Change 2007 (農業: 気候変動 2007) : Mitigation. Contribution of Working Group III to the Fourth Assessment Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Cambridge University Press, Cambridge, United kingdom and New York, NY, USA, pp. 497-540 (2007).
- 18) Smith P., Powlson D. S., Glending M. J., Smith J.: Preliminary estimates of the potential for carbon mitigation in European soils through no-till farming (ヨーロッパにおける不耕起栽培による土壌炭素貯留ポテンシャルの予備的推定), *Global Change Biology*, **4**, 679-685 (1998).
- 19) 田村憲司: 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 (1996).
- 20) West T. O., Post W. M.: Soil organic carbon sequestration rates by tillage and crop rotation: A global data analysis (耕うんと輪作による土壌有機炭素隔離速度: 地球規模のデータ解析). *Soil Science Society of America Journal*, **66**, 1930-1946 (2002).