

## 食料生産と気候変動緩和の一石二鳥 ～土壌は地球を救う！～

白戸康人\*

〔キーワード〕：土壌炭素貯留，緩和策，温室効果ガス，気候変動，ゼロエミッション

### 1. はじめに～2050 カーボンニュートラルと、 土壌炭素貯留への期待

気候変動が進行しつつあり、既にさまざまな影響が出始めていて、その影響は将来いっそう大きくなると予測されている。そんな中、世界中で、脱炭素社会の実現に向けた動きが急速に進んでおり、多くの国が野心的な温室効果ガス (Greenhouse Gas: GHG) の排出削減目標を公表している。日本政府も、2050年にカーボンニュートラル (CO<sub>2</sub> 排出の実質ゼロ) を目指すことを宣言した。それまでも、2050年に80%減など大きな削減目標を掲げてはいたが、「80%減」と「実質ゼロ」の違いは非常に大きい。80%減は省エネなどの努力を進めた先にたどり着ける可能性もあるが、いくら省エネを進めても完全に排出ゼロにはできないため、「実質ゼロ」とするには、CO<sub>2</sub>を吸収する「吸収源」が必ず必要になる。吸収源と言えば京都議定書において日本の削減目標の多くを担った森林を思い浮かべる人が多いと思うが、森林だけ

ではなく、農地土壌への炭素貯留にも大きな期待が寄せられている (さらには、陸地だけではなく、藻場などの海も!)。土壌への炭素貯留など、自然を活用した脱炭素技術は、他の工業的な方法や技術と比べて有利な点が多く、今後、期待はどんどん高まるだろう。我々農学者の出番である。

### 2. 土壌炭素と気候変動緩和

農地を含む陸域の生態系では、植物が光合成をしてCO<sub>2</sub>を吸収し、その植物体が土壌に還り、土壌中の微生物により分解されてCO<sub>2</sub>が大気に出る、というように、大気、植物、土壌の間で炭素 (C) が循環している (図1)。このうち「陸上植生」については、例えば森林では長期的に量が増加していつ「吸収源」となることがあるが、イネやムギなど農地の作物の多くは単年性のため、作物体に存在するCの量は長期的に変わらないとみなせる (短期的な、例えば季節変化はするが)。従って、土壌有機炭素 (SOC) が減少するなら大気CO<sub>2</sub>が増え、SOCが増加なら大気CO<sub>2</sub>が減る勘定になる。このことから、土壌の管理を工夫し、SOCを増やすことが気候変動

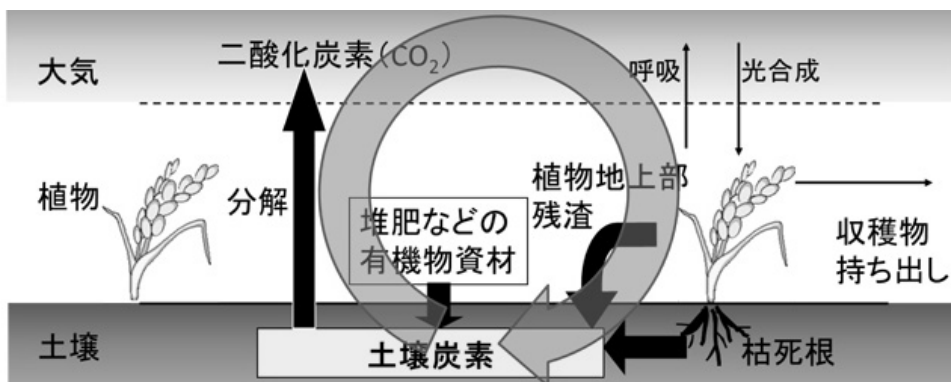


図1 土壌を中心とする農地の炭素 (C) 循環

Cは大気中の二酸化炭素 (CO<sub>2</sub>)、植物体中のC、土壌中の有機炭素 (SOC) と姿を変えながら循環しており、農地でSOCが増えることは、大気CO<sub>2</sub>の減少を意味する。

緩和につながるといえる。

しかも、地球全体で見ると、SOC量は、大気CO<sub>2</sub>の2倍、陸上植生の3倍以上であると推定されており (IPCC 2021)、非常に多量なので、その量の変化が地球全体のC循環に及ぼす影響は大きい。実際、過去に人為により失われた土地由来のC量はこれまでの産業革命以降の化石燃料消費のC総量を大きく上回るとの見積もり (Lal 2004) もある。これまで土地から放出した量が多いということは、土地を過去の状態に戻すことによる吸収源としてのポテンシャルも大きいことを意味する。すなわち、世界中のあちこちの農地でSOCを少しずつ増やせば、「チリも積もれば山となる」で非常に大きな吸収源となる可能性を秘めている。2015年にパリ協定と同時に立ち上がったフォーパーミル (4/1000) イニシアチブは、「全世界のSOC量を毎年0.4% (つまり4‰:4パーミル) ずつ増加させることができたら、大気CO<sub>2</sub>の増加をゼロにすることができる」という試算 (Soussana et al. 2019) に基づき、世界中で土壤へのC貯留を推進しようという国際的な大きな動きである。

また、土壤へのC貯留は、他の (工業的な) ネガティブエミッション技術と比べてコストが安いのも特徴である (IPCC 2022)。

### 3. 土壤Cを維持増進する土壤管理 ～食料生産との一石二鳥～

SOC量を増加させるためには、土壤にすき込む堆

肥や緑肥など有機物の投入量を増やすか、不耕起・省耕起栽培に切り替えるなど土壤有機物の分解を遅くする管理が有効である。図2は、世界で最も古い長期連用試験 (同じ圃場で長期間同じ管理を継続する試験) として有名な英国のローザムステッド農業試験場のデータで、堆肥を施用した畑では土壤C量が増加し続けることを示している。ただし、堆肥は製造にも散布にも労力がかかるので、園芸など、小面積で高収益が見込める労働集約的な品目に向いているが、大面積の土地利用型農業には向かないという見方もある。また、堆肥の総量が同じであれば、投入を増やした畑があれば投入量が減った畑もあるはずで、前者だけを評価してC貯留を主張するのは認められない (つまり、堆肥が移動しただけで、新たな大気CO<sub>2</sub>の吸収は起きていない) ので注意が必要である。一方、緑肥なら堆肥ほどの労力がかからないので、イネ、ムギ、ダイズなど土地利用型の品目にも向いているし、緑肥作物は確かにその場所で光合成してCO<sub>2</sub>を吸収するので上記の「堆肥の移動に過ぎない」問題は生じない。

堆肥や緑肥の施用は、作物の生産性を高めるために古くから農家が行ってきた土壤の有機物管理である。土壤のC量は、大まかに言って、窒素をはじめとする作物にとっての養分の量と相関があるし、保水性や排水性などの物理性の良さとも相関がある。つまり、土壤C量を増やすような土壤管理は、食料生産と気候変動緩和の両方に貢献する一石二

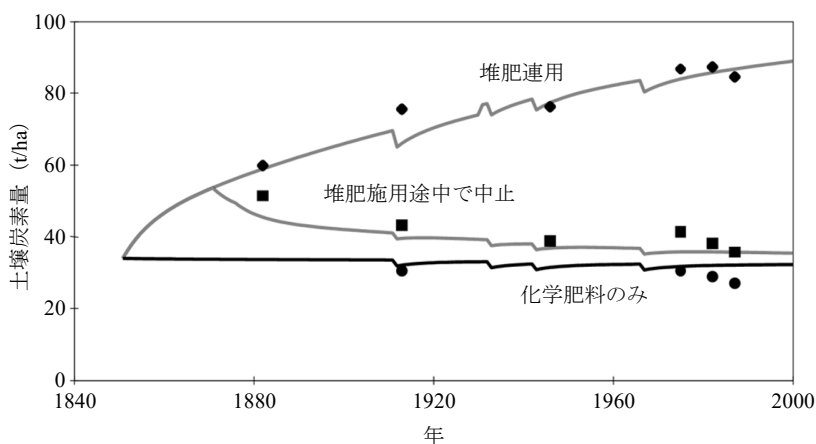


図2 英国ローザムステッド農業試験場の有名な長期連用試験の結果  
土壤炭素は堆肥の施用で増加し、化学肥料のみでは横ばいになる。堆肥施用を中止すると徐々に低下して元に戻ってしまう (Coleman & Jenkinson, 1996<sup>5)</sup> を改変)。

鳥ということになる。

堆肥や緑肥以外では、最近、バイオ炭が注目されている。堆肥や緑肥のように土壌中で土壌に固有のプロセスで安定な有機物の腐植がつけられるのとは違い、低酸素状態で加熱されて炭化することで炭素が安定化するので、Cの安定化のメカニズムは全く異なるが、炭化物は非常に安定で分解を受けにくく、多量のCを貯留できる可能性があるため、注目を集めている。

一方、Cの投入ではなく分解を減らすほうの技術では、不耕起・省耕起栽培が有効と言われている。世界では成功事例が多く報告されているが、日本のような高温多湿の気候では雑草対策など不利な条件もあり、これまでのところ日本ではあまり大きな広がりにはみせていない。

#### 4. トレードオフと総合評価

環境問題を考える際に考慮すべきこととして「トレードオフ」がある。一方を立てれば他方が立たなくなる、何かを達成するとき他の何かが犠牲になるということを目指す言葉であるが、環境問題では、「風が吹けば桶屋が儲かる」のように、様々な事象が複雑に絡み合っているために、物事の一面だけを見ていると思わぬところに悪影響が出るというトレードオフが起こりやすい。

例えば、前述した土壌へのC貯留を目指して農地への有機物の投入量を増やした場合、土壌C貯留という面だけを見ると確かに土壌C量の増加に伴いCO<sub>2</sub>の吸収が促進、あるいは排出が削減されることになるが、同時に、他のGHG（メタンや一酸化二窒素）の排出増加や、化石燃料消費によるCO<sub>2</sub>排出の増加を伴うこともある。よって、物事の一面だけを見ずに、総合的に評価することが大切である。

なお、メタンと一酸化二窒素は、気候変動への寄与としてはCO<sub>2</sub>に次ぐ2番目、3番目の気体であるが、排出量に占める農業の寄与が大きいと、農業分野においては排出削減の意義が大きい気体である。

上述したようなGHGに関するトレードオフの場合には、異なる種類のガスもすべて地球温暖化係数（GWP：Global Warming Potential）を使ってCO<sub>2</sub>に換算することでプラスの効果とマイナスの効果を両方同じ尺度で総合評価することができる。ただし、環境問題には、地球温暖化だけでなく、水質の富栄養

化、生物多様性、重金属などの有害化学物質など、種類の違う様々な環境へのインパクトがあり、これらを総合評価するには、LCA（Life Cycle Assessment）などの考え方をういた総合評価の手法が必要となる。地球温暖化は、これらの問題の一部に過ぎない。

#### 5. 緩和技術の普及のために

土壌管理の工夫による土壌へのC貯留の効果は、同じ管理を行ったとしても気候条件や土壌タイプなどの環境条件により異なる。また、前述したように他の環境負荷とのトレードオフも考慮しなければならない。これらのことを知り、農法と環境負荷の関係を理解する方法の一つとして、筆者らが開発したWebアプリケーション（白戸 2015）を紹介する（図3）。土壌への炭素貯留量やGHGの発生量は、その場所ごとの環境条件や管理で変わるが、それを簡単に計算できる「土壌のCO<sub>2</sub>吸収「見える化」サイト」を開発・公開している（<https://soilco2.rad.naro.go.jp/>）。このWebサイトでは、地図上で計算したい場所をクリックし、作物や管理の方法を簡単な操作で選択するだけで、土壌への炭素貯留量を、標準的な管理とユーザーが選んだ「あなたの管理」の場合で比較できる<sup>6)</sup>。このようなサイトを、意思決定を支援するツールとして、生産者や行政が意思決定に活用してくれることを望む。

このサイトは、普及啓発用、教育用という意味合いを重視し、ユーザーの操作は非常に簡単であるが、その裏側では土壌炭素動態モデル RothC が動いて土壌炭素の増減を計算する仕組みになっている。土壌炭素量の変化にしても、他のGHG排出にしても、最初は「まず測ってみる」ところから始まり、測る場所の条件（気象、土壌、土地利用、営農管理など）により観測値が異なることが分かってくると、その関係を一般化し、モデル化しようという試みが生まれる。このwebサイトは、そのようなこれまでのモニタリングとモデリングの両方の研究の蓄積に基づいたものである。モデリングの研究は、将来予測など実用的な利点があるのはもちろんであるが、現象のメカニズム理解にも有用であり、モニタリングとモデリングの両輪でこの分野の研究が進展し、脱炭素社会の実現という社会問題の解決に貢献することを望む。

図3 意思決定支援のためのwebサイト「土壌のCO<sub>2</sub>吸収「見える化」サイト」の概要

簡単な操作で場所や土壌の有機物管理に応じた土壌炭素量の増減を計算することができる。

3つの温室効果ガスの総合評価の結果表示

	あなたの管理	標準的管理
土壌炭素の増減によるCO <sub>2</sub> (tCO <sub>2</sub> /ha/年) (プラスが排出。マイナスが吸収)	-3.34	0.5
メタン (g-CH <sub>4</sub> /m <sup>2</sup> /年) CO <sub>2</sub> 換算 (tCO <sub>2</sub> /ha/年)	10.00 3.40	10.00 3.40
N <sub>2</sub> O (kg-N <sub>2</sub> O/10a) CO <sub>2</sub> 換算 (tCO <sub>2</sub> /ha/年)	0.13 0.39	0.07 0.20
うち化学肥料由来 (kg-N <sub>2</sub> O/10a) CO <sub>2</sub> 換算 (tCO <sub>2</sub> /ha/年)	0.02 0.05	0.02 0.05
うち堆肥由来 (kg-N <sub>2</sub> O/10a) CO <sub>2</sub> 換算 (tCO <sub>2</sub> /ha/年)	0.08 0.23	0.01 0.03
うち作物残渣由来 (kg-N <sub>2</sub> O/10a) CO <sub>2</sub> 換算 (tCO <sub>2</sub> /ha/年)	0.04 0.11	0.04 0.11
化石燃料由来のCO <sub>2</sub> (tCO <sub>2</sub> /ha/年)	2.02	2.02
合計 (tCO <sub>2</sub> /ha/yr) (プラスが排出。マイナスが吸収)	2.47	6.12

図3 意思決定支援のためのwebサイト「土壌のCO<sub>2</sub>吸収「見える化」サイト」の概要  
簡単な操作で場所や土壌の有機物管理に応じた土壌炭素量の増減を計算することができる。

## 6. 終わりに

本シンポジウムでの講演を依頼された際、「若手研究者へ有益な刺激を与える」ことを期待しているという言葉があった。私などがそう簡単に刺激など与えられるものではないと思っているが、私たちが取り組んでいるテーマは面白いですよ。GHGのゼロエミッションを目指すこれからの社会において、吸収源は必須であり、農地の土壌炭素貯留への期待は大きい。ポテンシャルも大きいし、食料生産にも環境にも役立つ一石二鳥で、やりがいがあるテーマだと思っています。一緒に研究をしてくれる若い仲間をお待ちしています。

## 引用文献

Coleman, K., and D. S. Jenkinson. 1996. RothC-26.3 - A model

for the turnover of carbon in soil. In Powelson, D. S., P. Smith, and J. U. Smith eds., Evaluation of Soil Organic Matter Models: Using Existing Long-Term Datasets. Springer-Verlag, Berlin. 237-246.

IPCC 2021. Climate change 2021: The Physical Science Basis, Contribution of Working Group I to the sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change.  
IPCC 2022. Climate change 2022: Mitigation of Climate Change, Contribution of Working Group III to the sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change.

Lal, R. 2004. Soil carbon sequestration impacts on global climate change and food security, Science, 304, 1623-1627.

白戸康人 (2015) 農地の温室効果ガス吸排出を総合評価するウェブサイト, ニューカントリー, 738, 42-43.

Soussana, J. F., Lutfalla, S., Ehrhardt, F., Rosenstock, T., Lamanna, C., Havlicek, P., Richardsd, M., Wollenberg, E., Chotte, J. L., Torquebiau, E., Ciais, P., Smith, P., Lal, R. (2019) Matching policy and science: Rationale for the '4 per 1000 - soils for food security and climate' initiative, Soil and Tillage research, 188, 3-15.