

土壌炭素を増やす農地管理が温暖化を緩和する

農業環境技術研究所 農業環境インベントリーセンター
白戸 康人

1. はじめに

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。しかし、それだけではない。森林伐採などの土地利用変化によるバイオマスの消失や土壌有機物の分解によるCO₂の放出も、かなりの量になることが知られている。例えば「森林吸収源」という言葉があるように、森林、農地などの「土地」からも温室効果ガスが発生したり吸収されたりしており、その管理方法を工夫することによって排出を減らしたり吸収を増やすことができる。

森林吸収源という言葉から連想するのは、木が光合成によりCO₂を吸収して生長し、幹や枝が年々太っていくことであるが、足元にある土壌の中にも、土壌有機物というかたちで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、木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1兆5000億トンの炭素が存在すると見積もられており、これは大気CO₂の約2倍、陸上の植物バイオマスの約3倍に相当する。このように、土壌中の炭素は非常に量が多いため、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る。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(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あたる。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。土壌炭素が増減するメカニズムを解明することにより、どのような管理方法をどの程度の規模で行うと土壌炭素がどの程度増えるのか、定量的に予測することが求められている。

2. 土壌炭素を増減させる要因

土壌炭素の含量は、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)の差により収支が決まるので、条件によって増えも減りもする。どのような条件で増え、どのような条件で減るのだろうか。

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、根から分泌される有機物なども含まれる。農地では、地上部と地下部の

生長量から収穫物などの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を含む。次に、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 CN 比が大きいほど土壤中での分解は遅く、また、有機物がリグニン、セルロースなどの成分を多く含むほど分解が遅くなることが知られている。

一方、出力側の因子としては、まず、温度、土壤水分などの環境因子が挙げられる。例えば、温度が高くなれば、土壤有機物の分解速度が大きくなる。水分では、一般に、土壤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おり、最大容水量の 70~80% 程度の土壤水分条件で最も有機物の分解が速いと言われている。土壤の基本的な理化学性も有機物分解に影響を与える。例えば土壤の粒径組成では、一般に粘土質の土壤では砂質の土壤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、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。また、pH が低い土壤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壤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壤中に存在する根、投入された堆肥などの有機物資材が土壤とよく混合されるため、耕起は土壤有機物分解を速める効果がある。

土壤炭素量は、地球温暖化などの自然的環境条件の変化により変動し、また、土地利用変化や農法の変化など的人為的要因によっても変動するが、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、気象や土壤の母材など他の条件が同じ場合は、畑よりも土壤有機炭素含量が高い。これは上記の因子のうち、主に土壤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、土壤炭素含量が低い。これは、農地では耕起により分解が速まることと、土壤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。

3. 日本の農耕地における土壤炭素の変動実態

我が国において、実際に、農耕地土壤の炭素は最近増えているのか、それとも減っているのだろうか。中井（2006）は、約 2 万地点の農地の 20 年間の土壤炭素の変化を調べた農林水産省の調査事業である土壤環境基礎調査・定点調査の結果を解析した。

全体の合計量はあまり変化していないが、農耕地の種類（地目）別にみると、土壤炭素含量は、普通畑では減少する傾向が見られたが、水田ではほとんど変化していなかった。畑での減少は、投入される堆肥やきゅう肥などの有機物の量が少なくなっていることが影響していると考えられた。水田において畑のように減少していないのは、湛水（水を張ること）によって土壤有機物の分解が抑制されるためと考えられた。樹園地では、水田や普通畑とは逆に、土壤炭素が増加する傾向が見られた。これは、耕起回数が少ないため土壤有機物の分解が抑制されることが影響していると考えられた。

土壤の種類別にみると、土壤炭素含量がもともと少ない土壤では有機物が蓄積しやすく、そのため炭素含量が減少しにくいことが分かった。逆に、もともと炭素含量が多い土壤では減少しやすいことになる。例えば、火山灰の影響を受けた黒ボク土ではもともと有機物の量が多いが、そのような土壤では、高レベルの有機物量を維持するために多量の有機物投入が必要であるため、普通の管理では減少しやすいといえる。

4. 将来予測とモデル化

例えば、ある農地で堆肥を毎年ある量施用した場合、土壌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試験を行うことである。たとえば堆肥を10アールあたり1トン、3トン、5トン投入する処理区を設けて土壌炭素を毎年測る、という試験を行えば、同じ畑で堆肥を2トン、4トン投入した場合についても、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、この試験だけからはわからない。また、土壌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、土壌の炭素動態に影響する気候、土壌、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、農法など）についての法則を導き出して一般化し、数式として取り入れ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の蓄積量を予測するというものである。

世界では多数の土壌炭素動態モデルが提案されており、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十分に妥当性が検証されているモデルは存在しなかった。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（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。

5. ライフサイクルアセスメント（LCA）の視点

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、ひとつ、気をつけなければいけないことがある。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と呼ばれる評価方法により、「全体としてどうなのか」を評価することが必要になる。

6. おわりに～かけがえのない土壌資源

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様々な段階の有機物として存在しており、これらの有機物は、様々な機能を発揮して植物生産、つまり農業に役立っているため、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。

農業生産を支える土壌有機物の機能は、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、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するため、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。

3) 生物的性質の向上：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。

一方、有機物の農地への施用には、注意しなければならない点もある。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。また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。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。

このように、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。

参考文献

- 1) 木村真人・波多野隆介 編 (2005) : 土壌圏と地球温暖化, p. 246, 名古屋大学出版会、名古屋
- 2) 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
- 3) 中井 信 (2006) : 農耕地土壌調査の現状と課題, 農業, 1487, 31-42
- 4) 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研究報告, 24, 21-92