

土壌による炭素貯留と地球温暖化

日本学士院会員 和田光史

第 54 回日本学士院公開講演会

2011 年 5 月 28 日

松山大学

CO₂ の大気への放出超過による地球温暖化が問題になり、これを抑制する様々の取り組みがある。土壌は CO₂ の炭素を有機物として大気から隔離・貯留して、人間活動による CO₂ の放出超過を相殺する温暖化抑制に貴重な貢献をしている。本講演では、土壌の炭素貯留の仕組み、土壌の種類や管理・利用の影響、貯留増強の方策について、これまでの研究の展望を試みた。地球温暖化を巡る情勢が予断を許さない中で、今後、さらに土壌の炭素貯留能についての理解を深め、その増強を図る研究の継続と新展開が必要である。

スライド説明

1 大気中の二酸化炭素ガス、CO₂ は、太陽から来る熱エネルギーを吸収し、これを地表に向け放出し、地表平均温度を大気がないときのマイナス 18℃からプラス 15℃に上昇させる。これを CO₂ の温室効果という。現在問題になっているのは、化石燃料の使用をはじめとする人間の活動増大が大気 CO₂ の増加を引き起こし、温室効果を超えた温暖化、地球温暖化を起こしていることである。

2 この図は、南極 Vostock 基地で氷の堆積物、氷床から採取した氷柱コア試料について明らかにされた、過去 40 万年間の大気の CO₂ 濃度と温度との関係を示している。黒線で示した CO₂ 濃度は 180 から 300ppm の間、また、赤線で示した大気の温度はマイナス 9℃からプラス 3℃の間で上昇・下降を繰り返しているが、CO₂ 濃度の上昇・下降と温度の上昇・下降は常に対応している。コアを採取した氷の深さから年代、氷に封じ込められた気泡の CO₂ 濃度から当時の大気の CO₂ 濃度、氷の重酸素同位体比から当時の大気の温度を推定している。図の低温期、高温期は、それぞれ氷河期、間氷期に対応し、現在は高温の間氷期であるが、図右端の CO₂ 濃度の急上昇は、過去 40 万年間に見られなかった地球温暖化を示している。

3 20 世紀後半に始まる人間の経済活動増大に起因する大気 CO₂ 濃度増加が地球温暖化を引き起こしていることを初めて明確にしたのは、IPCC、気候変動政府間パネルの 2007 年報告書である。また、報告書は、この地球温暖化の結果、21 世紀末に

は地球平均気温が 6℃上昇すること、猛暑、干ばつなどの異常気象、氷河融解、海面上昇、生物多様性の崩壊などが起こることを予告している。

大気 CO₂ 濃度の増加によって地球温暖化が起きていることから明らかなように、温暖化抑制の基本は、大気から CO₂ を隔離・貯留することである。CO₂ を構成する炭素を土壌に有機物として貯留することは、このような取り組みの一つである。

4 地球上の炭素は大気、陸地、海洋に分かれて存在している。この図の炭素の存在量を示す数字の単位はギガトン、10 億トンである。地球上の炭素の最大の存在箇所は海洋で 39,000 ギガトンの炭素が存在している。陸地には、植物に 610 ギガトン、土壌に 1,580 ギガトンの炭素が有機物として、さらに土壌には 950 ギガトンの炭素が無機物の炭酸塩として存在している。大気には 800 ギガトンの炭素が CO₂ として存在して、温暖化を引き起こし、その大気中濃度は 2008 年には 380ppm に達している。土壌は、炭素として、大気の約 2 倍、植物の約 2.5 倍の炭素を貯留する働きをしている。

5 陸地では、植物、動物、微生物、そして土壌のつながりによって、CO₂ は大気から隔離されて、その炭素は有機物として貯留される。植物は太陽エネルギーを利用する光合成で CO₂、水、無機物（ミネラル）から有機物をつくる。有機物は、植物の体を構成するとともに、植物体を栄養として利用する動物、微生物の体も構成し、陸上生物が大気から CO₂ を隔離し、その炭素を有機物として貯留する仕組みをつくり出している。土壌は、植物の根、土壌で生活する動物、微生物の生命を支えるとともに、植物、動物、微生物の遺体を受け入れ、これを土壌に固有の有機物、腐植につくり変え、貯留する。一方、植物、動物、微生物は、生命維持のエネルギー獲得のために、呼吸で有機物を分解し、その炭素を大気中に CO₂ として放出する。

6 この表は、地球上での 1 年当たりの CO₂ の大気への放出と大気からの隔離・貯留を、放出源・貯留先別に炭素量として集計している。陸地の植物と土壌は、光合成・腐植化によって 111.4 ギガトンの炭素を貯留する一方で、呼吸によって 110 ギガトンの炭素を大気に放出している。また、海洋は主として CO₂ の溶解で 91.7 ギガトンの炭素を貯留する一方、その逆反応である CO₂ の放散によって 90 ギガトンの炭素を大気に放出している。貯留と放出の差し引きで、陸地の植物と土壌は 1.4 ギガトン、また海洋は 1.7 ギガトン、炭素の貯留量が放出量を上回り、温暖化抑制に貢献している。これに対し、化石燃料の燃焼と農業などの土地利用は、CO₂ を一方的に大気中に放出し、前者の 6.3 と後者の 1.6 を合計した 7.9 ギガトンの炭素放出が現在の温暖化の主要因となっている。

7 CO₂の大気への放出超過による地球温暖化を抑制するには、CO₂放出超過の主要因である化石燃料の燃焼や農業などの土地利用でのCO₂放出抑制が基本になる。このCO₂放出抑制には1997年の『京都議定書』の採択以降、産業、運輸、民生各部門で、国内外で具体的に様々の取り組みが行われている。

地球上で、CO₂の大気からの隔離・貯留量を超えて、1年に大気へ放出される炭素量は3.2ギガトンである。これは土壌の有機炭素量1580ギガトンの0.2%に相当するので、1年に土壌の有機炭素量に0.2%の増加があれば、大気へのCO₂の放出超過は打ち消され、温暖化は阻止されるという立論が可能になる。一方、陸地の植物と土壌によって、大気から1年に放出を上回り貯留されている炭素量は1.4ギガトンで、放出超過の3.2ギガトンはその2倍、230%に相当する。200%を超える炭素の貯留増加を直ちに実現することの困難は明らかで、当面は0.2%と200%との間で実現可能な土壌の炭素貯留増強を模索することが必要と判断される。

8 土壌による有機物炭素の貯留は土壌の種類によって大きく異なる。最近の国際的分類「Soil Taxonomy」では、世界の土壌を12種類（12土壌目という）に大別している。この分類は、米国農務省の土壌調査グループが主導して、世界の土壌研究者の協力の下に推進されている。

大別した12の土壌目については、各土壌目の土壌が保持する有機炭素量と地表占有面積が公表されている。土壌の種類による炭素貯留能力の違いを見るために、各土壌目土壌の有機炭素量を占有面積で割って、土壌の面積1m²、深さ1m、すなわち土壌1m³当たりの炭素量を各土壌目土壌の炭素貯留能として算出すると、最高値は205、最低値は3.5、平均値は29kg炭素となり、土壌の種類によって大きく異なる。ここでは、5つの土壌目を選んでその有機物炭素貯留について説明する。

9 最初に説明する土壌はヒストソルである。ヒストソルのヒストはギリシャ語で「組織」を意味する。ソルはラテン語のソラム、土を意味し、どの土壌目でも名前の末尾に付ける。ヒストソルの炭素貯留能は12土壌目中第1位で1m³土壌当たり205kg炭素と大きく、占有面積割合は第11位で1.2%に過ぎないが、貯留している有機炭素量は第2位、324ギガトンである。ヒストソルは寒冷気候下の湿地で生ずる有機質土壌で、泥炭土、PEATとも呼ばれる。低温、過湿で植物遺体の微生物による分解が制約され、その「組織」を留めた有機物が集積している。

10 ヒストソルの断面写真で分解不十分な植物遺体が水中に堆積している。もし排水され、空気に曝されると微生物による分解が急激に進み、土壌は収縮・沈下する。

11 次は炭素貯留能第2位の土壌、アンディソルである。名前は「暗土」という日

本語に由来するとされている。炭素貯留能は第2位であるが、有機炭素量が第11位と低いのは、占有面積割合が最下位の1%不足のためである。活火山帯の湿潤ないし半乾燥気候下で火山灰から生ずるので、火山灰土とも呼ばれる土壌である。自然植生、とくに草地で、微生物の活動に好適な気候条件下でも、微生物による分解を免れて、黒色の腐植が集積していることが特徴である。

1 2 約5～8千年前に噴火した富士山の火山灰から生じたアンディソルである。黒色腐植が長期間土壌中に安定して存在、炭素の貯留に貢献していることを示している。

1 3 アンディソルがなぜ高い炭素貯留能を示すのかは、火山灰の風化・土壌化の過程で生ずるアルミニウムイオンと特異な粘土鉱物との働きによることが、日本の土壌研究によって明らかにされた。火山灰は細粒で、火山ガラスを主成分とし、同じマグマからできた岩石に比べて風化しやすい。風化によって火山灰から溶け出たアルミニウムイオンは、土壌に入ってくる有機物の腐植化過程で、腐植と結合して、その生物毒性によって、微生物による分解から腐植を保護・貯留する。また、アルミニウムイオンは、風化によって火山灰から溶け出たケイ酸イオンと反応して極微のナノボール鉱物アロフェン、ナノチューブ鉱物イモゴライトという珍しい粘土鉱物をつくる。これらの粘土鉱物は、そのナノボール、ナノチューブの表面に腐植を結合し、この結合によって腐植を微生物による分解から保護・貯留する。

1 4 九州の人吉地方で「いもご」と呼ばれる火山灰土に生じているアロフェンとイモゴライトの電子顕微鏡写真である。まだナノという言葉になじみがなかった時代に、九州大学の大学院生であった愛媛大学逸見教授が撮影した写真である。スケールの100Å（オングストローム）はナノメーター（10億分の1メートル）に直せば10ナノメーターになる。

1 5 炭素貯留能第3位の土壌は、ラテン語の「凍る」が名前に入っているジェリソルである。占有面積割合も第5位、9%と高く、有機炭素量も第3位、238ギガトンと大きい。寒帯あるいは高山域のツンドラに存在する、永久凍土とも呼ばれる土壌である。表土と下層土の一部は、夏には氷が溶けて一時的に湿地植物が生育し、秋には再凍結する。土壌に入った有機物は、低温で微生物の活動が停止することによって、分解を免れて貯留される。

1 6 ジェリソルの断面写真で表層に黒色の腐植、下層土は白っぽく、凍結している様子を示している。

17 アルティソルは、炭素貯留能が 12 土壌目中、第 9 位の土壌で、ラテン権の「終局の」が名前に入っている。占有面積割合はジェリソルに次ぐ第 6 位であるが、炭素貯留能が低いために、有機炭素量はジェリソルの第 3 位に対し、第 7 位にとどまっている。日本を含めて温帯から熱帯に広く分布し、湿潤気候下で風化・土壌化が強く進行しているため「終局の」土壌と呼ばれる。腐植の集積は外見上明確でなく、温・熱帯、湿潤条件下で微生物による有機物分解が進んでいる。風化・土壌化で生成した粘土は下層土に移行・集積している。

18 アルティソルの断面写真で、強い風化で粘土鉱物と赤褐色酸化鉄鉱物が生成している。表層と下層で土色に違いが見られるのは、不明確ではあるが表層の腐植の集積と水による粘土の表層から下層への移行による。温帯から熱帯にかけて分布する炭素貯留能が低い土壌の典型である。

19 5つの土壌目の最後に示すアリデイソルは、炭素貯留能最下位の土壌で、ラテン語の「乾燥」が名前に入っている。占有面積割合は第 3 位で 12%と分布が広いのに、炭素貯留能が低いために、土壌炭素量は第 10 位で、炭素貯留への貢献が低い問題土壌である。アリデイソルは乾燥ないし半乾燥気候下の砂漠で生ずる。砂漠では、土壌から空中へ動く水の量（蒸発量）が、土壌に入る雨水の量（降水量）を上回り、土壌中で水に溶解した塩類が水の動きとともに動いて、土壌表面あるいは土壌中に集積する。塩類の集積に適応していない通常の植物は生育不可能で、土壌化も進まず、植物による土壌への有機物供給、したがって土壌の炭素貯留は極めて限られる。

20 アリデイソルの断面写真で、強い乾燥によって植物の生育、岩石の風化・土壌化が限定され、有機物の集積、炭素貯留は極めて少ない。

21 土壌の炭素貯留に影響する主要因は、第一は、5つの土壌目について例示したように、土壌の生成に関わる自然要因、気候（温度と乾湿）、生物（植生、微生物活動）、母材（岩石）、時間である。第二は、ここに示したような土壌の物理的性質、あるいは化学的性質とその植物と微生物の活動への影響である。第三は、これから述べる人間による土壌への働きかけ、人間による土壌の利用・管理である。

22 人間による土壌の管理・利用は、土壌の物理的性質、化学的性質が植物と微生物の活動に及ぼす影響を通じて、土壌有機物の貯留・分解に影響する。土壌有機物の貯留・分解は、農地における作物の生産、また林地における林木の生産を通じて人間の食・住確保につながるとともに、大気に対する CO₂ の放出・隔離を通じて地球温暖化に影響する。

2.3 森林と森林土壌の管理は、土壌による炭素貯留増強に重要で、具体的には、林木の生育を促進するための施肥、熱帯の発展途上国で行われる森林を焼却、開墾して農地とする焼畑の停止、湿地や泥炭地の森林、老齢林の保護が挙げられる。さらに、造林は、過去 50 年間森林がなかった、世界の陸地の 2.6%に達する再植林可能地で実施すれば、達成される炭素貯留は年間 1.5 ギガトンと推定されている。この 1.5 ギガトンは、先に述べた現在の CO₂ の大気への放出超過炭素量 3.2 ギガトンの半分近くに相当し、造林の有効性を示している。しかし、土地利用が競合する中で、どれだけの規模の土地を再植林に確保できるかが問題である。

2.4 農業による土地利用は土壌の有機物炭素貯留に大きく影響する。農業は、有機物である収穫物、さらには収穫残滓を農地から持ち出し、また、微生物による土壌有機物の分解を促進して作物養分とすることで、土壌有機物、したがって土壌の炭素貯留を減少させる。農地の作物栽培では、土壌有機物は、開始後速やかに、その後緩やかに、数十年で栽培前の 1/3 から 2/3 に減少することが明らかにされている。この土壌有機物の減少は、作物生産力の低下、浸食によって土壌が失われることに加えて、土壌有機物の分解促進で起こる CO₂ 放出が温暖化を促進することで問題となる。

2.5 過去 1 万年間の農業による世界の土壌有機物炭素の損失は 42 から 78 ギガトンに上ると推定されている。一方、この損失を農地管理の改善によって回復しようとする試みも進められていて、最大で過去の損失の 1/2 ないし 2/3、これを数十年で達成するとすれば 1 年当たり 0.4 ないし 1.2 ギガトンの炭素貯留の回復が期待されている。この期待値は、現在の陸地植物と土壌による炭素貯留の 1 年当たり 1.4 ギガトンよりはやや低く、CO₂ の大気放出超過 3.2 ギガトンよりは明らかに低いが、土壌炭素貯留増強のために、農地管理の改善を推進することに十分な意義があることを示している。

2.6 農地管理の改善による土壌有機炭素の貯留増加には三つの方策がある。

第一は古くから行われてきた、作物収量の増加とともに、土壌有機物の増加を図って行う堆肥あるいは厩肥の投入である。

第二は、不耕起 省耕起栽培である。作物の種まき、植え付け前に、土を耕さない不耕起、あるいは省耕起と収穫後に作物残滓で土壌を被覆（マルチという）することを組み合わせる。不耕起、省耕起は、耕起の目的の一つである微生物による有機物の分解を抑制し、炭素貯留の増加につながることを期待して行う。

第三は、作物株の列の間に他の作物を栽培する間作である。不耕起・省耕起栽培のマルチとともに、農地の裸地化防止と土壌有機物の増加、土壌浸食の抑制を通じて、土壌の炭素貯留に寄与することを期待して行う。

27 左の写真はコムギの間作に用いたクローバーの生育、右の写真はダイズ・トウモロコシの不耕起連作で、トウモロコシの収穫後に播種したダイズがトウモロコシの残滓の間から芽を出している様子を示している。

28 比較的広い地域、世界全域、米国、米国東南部、バージニアを対象とし、不耕起年数5ないし20年にわたる試験での土壌の炭素貯留増加を示している。試験によって土壌炭素貯留に差はあるが、平均値で見れば1ヘクタール・1年当たりの炭素貯留増加は89ないし570kgである。これは温帯から熱帯に広く分布するアルティソルの炭素量の0.10ないし0.63%に相当し、先に述べた地球温暖化抑制に有効な土壌の炭素貯留量増加の0.2%と比べて、不耕起は十分試みに値することを示している。

29 1990年代から2000年代にかけ、6ないし20年にわたる、岡山、茨城、鳥取、十勝の水田・畑での栽培試験で見られた、不・省耕起による土壌炭素貯留の変化を示している。土壌炭素量は、岡山、茨城では不耕起で増加したが、茨城では耕起・不耕起間で差がなかった。残りの鳥取、十勝では、土壌炭素量は不・省耕起でも減少したが、不・省耕起はその減少を抑制する効果を示した。すべての試験で作物収量に耕起、不・省耕起の間で差はなく、収穫作物残滓は十勝を除いて全量投入された。これらの試験を実施した研究者は、土壌有機物増強の視点から、不耕起、あるいは断続不耕起を推進すべきとする意見を表明している。

30 米国では、1994年には農地の14%であった不耕起が10年後の2004年には23%にまで増加した。この増加は、生産者、研究者、政策立案者による連続不耕起全般の評価を反映している。評価されたのは、土壌有機物による土壌の改善とその結果としての土壌浸食の防止、不耕起の省エネ効果、炭素貯留の地球温暖化抑制への寄与である。しかし、一方では、連続不耕起によって、養分としての土壌の窒素の利用、病虫害や雑草の防除、堆肥・厩肥の投入、耕さないことによる土壌の圧縮・緻密化などが問題になっている。このような状況の中で、不耕起による問題を回避し、その利点を生かし、炭素貯留については少しでも現状を超えることをめざして、不耕起栽培の連続から断続への転換が図られている。

31 不耕起などの農地管理改善によって土壌の有機物貯留を回復・増強する試みとは別に、投入する有機物に手を加えて、土壌の炭素貯留増強を図る試みもある。その一つが植物体（植物バイオマスという）を酸素が十分でないところで蒸し焼きにして炭をつくり、土壌に加えるバイオチャーである。バイオチャーつくりの有機物燃焼はCO₂の放出が少なく、できた炭は有機物とは違って土壌中で微生物による分解を免れて長期にわたって安定で、土壌炭素貯留の目的に適している。

3 2 バイオチャー利用のきっかけとなったのは、1990 年以降の中央アマゾンでの Terra Preta 土壌研究である。この土壌には、500 年以上にわたって、住民が炭、有機質のごみ、骨を加え、周辺の土壌に比べて、炭が 70 倍以上、また、有機物、窒素、リンも 3 倍以上含まれている。土壌の生産力が高く、バイオチャーの炭素貯留による温暖化抑制効果に注目して新しい Terra Preta つくりが提案された。

3 3 写真の左側は中央アマゾンに普通に見られる土壌、右側はそれに住民が炭を加えて改変した Terra Preta 土壌である。

3 4 現代向けバイオチャーでは、規模を拡大して、植物を育て、収穫した植物バイオマスを低酸素・低温で、熱分解して高炭素・細粒の炭を製造、これを土壌に投入する。熱分解過程で生成する排ガスをエネルギー源として利用すれば、植物の栽培、バイオチャーの製造、土壌投入までの過程を通じて、投入エネルギーは回収できて、大気からの CO₂ 隔離・貯留は大気への CO₂ 放出を確実に上回る。しかし、バイオチャー実現にはコストと規模拡大の効果の研究が必要である。

3 5 この他に、まだ本格的な研究がないが、アンディソル研究を生かして試みたいのは、12 土壌目中第 2 位のアンディソルの炭素貯留をモデルに、有機物貯留の仕組みを人為的に土壌内につくり出して、炭素貯留の増強を図ることである。米国の不耕起栽培で得られた炭素貯留増加の実績 1 年・1 ヘクタール当たり 89kg と見合う 100kg の炭素貯留は、アンディソルの研究では、10 ないし 14kg のアルミニウムと腐植との反応で可能になっている。これを超える炭素を含む有機物の投入を前提に、適切なアルミニウム資材と投入方法を見出すことは土壌炭素の貯留増強方策として試みるに値すると考える。

3 6 最後に、植物—土壌による炭素貯留に問題となる影響を及ぼしている大気 CO₂ 濃度の上昇と気候との関係について述べる。この図は、南極とハワイ Mauna Loa で 6 ヶ月毎に測定した CO₂ 濃度から算定した地球大気の CO₂ 濃度の上昇速度（黒点：ppm/年）と測定期間中に起きたエルニーニョ現象・南方振動（高温相・低温相の強さを背景の褐色・青色の濃淡で表現）との関係を示している。地球大気 CO₂ 濃度の上昇速度は、1960 年以降 2006 年にかけて一様に増大を続け、温暖化の進行を示しているが、高温相が強く現れるときに上昇速度が大きくなる傾向が明らかである。これは、高温と干ばつが植物の呼吸と微生物の有機物分解活動の増大を通じて植物—土壌の炭素貯留を低下させ、大気への CO₂ 放出増加によって温暖化をさらに助長している可能性を示し、その対策が今後必要と考えられる。