

農業と気候変動

農業は温室効果ガスの主要な発生源

近年、地球温暖化によると考えられる記録的な高温、大雨などの極端な気象がたびたび発生し、農業にも大きな被害を及ぼしている。国際的な専門家をつくる政府間機構である「気候変動に関する政府間パネル」(IPCC)の第5次評価報告書(IR5, 2014年)では、20世紀半ば以降観察されている気候変動は、人間活動の影響が主な要因である可能性が極めて高い(95%)と結論し、温室効果ガスの排出がこのまま増え続けると、2100年の気温は産業革命以前から3.7～4.8℃上昇すると警告する。これは人類がかつて経験したことのない急激な温度上昇であり、生態系が適応できるかどうか疑問視されている。人類の生存をもかけて、知恵を絞った対応が急がれる所以である。

日本においても農業生産に対する温暖化の影響はすでに様々な形で表れてきており、農業は温暖化の被害者としての側面で語られることが多い。しかし一方で、農業は温室効果ガスの主要な発生源の一つであり、温暖化の緩和のためには農業由来の温室効果ガスの削減が重要である。

ここでは農業からの温室効果ガスの発生について概説し、環境と調和した持続的な農業実現のための今後の方向を考える。

急上昇する大気中二酸化炭素濃度と農業

大気中の二酸化炭素濃度は産業革命前(1750年ごろ)には278ppmであったが、その後上昇に転じ、現在は44%増の400ppmを突破している。46億年という長い地球の歴史でみると大気中の二酸化炭素濃度は変動してきたが、石器の使用が始まる今より約200万年前から産業革命が始まるまでの間は、300ppmを超えることはなかった。因みに原人のアフリカ出自は100万年以上前、現生人類の誕生は約20万年前である。

この大気中二酸化炭素濃度の急激な増加の原因は人為的なもので、最大の要因は産業革命以来の化石エネルギーの大量消費により、石炭、石油として凝縮した形で蓄積されていた炭素が二酸化炭素となって放出されたことである。しかし同時にまた、農業の開始(農業革命、約1万年前)以来、人類は農業や放牧のために森林を伐採・開墾して農地を広げ、

公益財団法人日本植物調節剤研究協会

宮下 清貴

樹木を燃料として利用し、土壌中に有機物として蓄積していた炭素を大気中に放出させてきたことも、二酸化炭素濃度増加の大きな要因である。

温室効果ガスの種類

温室効果ガス(Greenhouse gas)とは、地球の表面や大気、雲において、特定の波長の放射線を吸収・放出することで温室効果を引き起こすガスのことである。もし大気中に温室効果ガスがなかったとすれば、地表面の温度は現在よりもかなり低くなり、地球は凍りついた惑星となる。地球が宇宙から吸収しているエネルギーと地球から放出しているエネルギーが平衡状態にあれば温度は安定だが、最近の観測ではエネルギーは入超で、地球は温まりつつある。その主要な原因は、大気中の二酸化炭素の急激な増加である。

人間活動によって増加した主な温室効果ガスとしては、二酸化炭素(CO₂)、メタン(CH₄)、一酸化二窒素(亜酸化窒素, N₂O)、フロン類、オゾン等



農業と温室効果ガスの関係は一概には語れない。▶

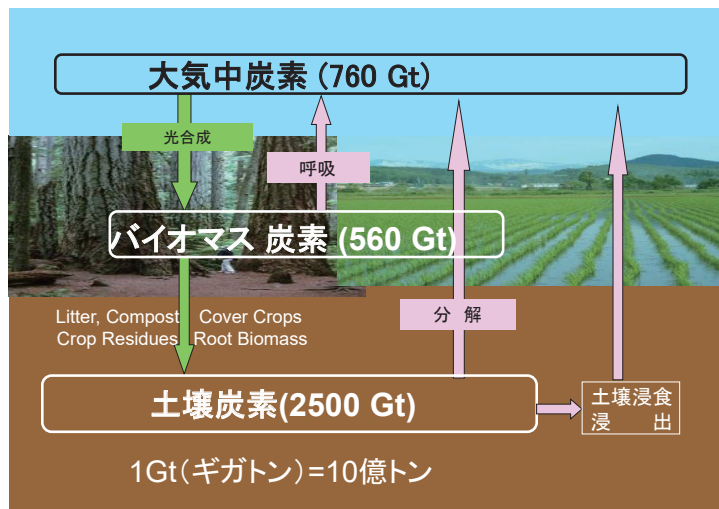


図-1 大気、バイオマス、土壌中の炭素の存在量と循環

どのバイオマス中に560Gt、土壌中に2,500Gt（うち土壌有機炭素が1550Gt、土壌無機炭素が950Gt）ある。このように、土壌炭素プールは大気炭素プールの3.3倍、生物炭素プールの4.5倍と大きい（図-1）。

大気中の二酸化炭素は光合成によりバイオマス炭素となり、植物が枯死すると植物残さなどとして土壌中に入り土壌炭素となる。土壌中の有機物が分解すると二酸化炭素となり、大気中に付加される。このように、地球上で炭素は基本的にこの3つのプールの間を循環しているといえ、平衡が崩れるとそれぞれのプールの増減が起こる。

森林などの自然生態系を農耕地に転換すると、土壌有機物の分解が始まる。その結果、温帯では土壌有機炭素の60%、熱帯では75%以上が消失し、その分大気中二酸化炭素濃度が増加する。自然生態系の農耕地への転換は同時に、土壌の質の低下、バイオマス生産量の減少、水質の悪化など、環境資源の悪化をもたらす。温暖化が進むと微生物の分解活性が上昇し、その結果土壌有機物の消耗が加速する（正のフィードバック）。人類が農業を開始してから産業革命前までの間（約7800年）に陸上生態系から放出された炭素量は320Gt（1年に0.04Gt）で、産業革命以降の200年間で放出された量は160Gt（1年に0.8Gt）と計算されている。

このように、土壌炭素の減少は大気中二酸化炭素を増加させて温暖化の原因となり、逆に土壌炭素の大量集積・

がある。このうち農業由来の温室効果ガスは、二酸化炭素、メタン、一酸化二窒素である。大気中のメタンと一酸化二窒素は、主要な発生源が農業である。温室効果（地球温暖化係数）はそれぞれのガスによって異なり、二酸化炭素のそれを1とすると、メタンは20倍以上、一酸化二窒素は約300倍とかなり大きい。このことから、排出量が多い二酸化炭素に加え、排出係数の高いメタン、一酸化二窒素についても削減が重要である。なお排出量を議論する場合、メタンや一酸化二窒素については、地球温暖化係数から二酸化炭素量に換算して表される。各種ガスの排出量の割合（2010年）は、二酸化炭素76%（うち化石燃料の燃焼、工業プロセス起源65%、林業・土地利用変化起源11%）、メタン16%、一酸化二窒素6.2%である。

二酸化炭素の放出量

今まで人為的に二酸化炭素として放出された炭素の量は、どのくらいになるのだろうか。ここでは重さの単位をギガトン(Gt)で表す(1Gt=10億トン=10⁹トン)。計算では、2011年までの人為起源の二酸化炭素の総排出量は炭素換算で約555Gtで、そのうち3分の2にあたる375Gtが化石燃

料の燃焼やセメント生産過程からの排出、残り3分の1が農業生産と土地利用変化（森林伐採、開墾等）起源と見積られる。人為起源の累積二酸化炭素排出量の約半分は最近40年間に排出されており、中でも直近の10年間の増加が特に著しい。排出量の増加割合は、1970年～2000年は年平均1.3%であったのに対し、2000～2010年は2.2%となっている。

2013年度の温室効果ガスの総排出量は14億800万トン（二酸化炭素換算）であり、この数値は1990年度の総排出量から10.8%、2005年度から0.8%の増加である。うち二酸化炭素の排出量は13億1100万トンであり（土地利用変化及び林業分野を除く）、温室効果ガス総排出量の93.1%を占めている。

大気中のメタン濃度については、産業革命前は700～750ppbであったが、1992年には1,720ppbと増加し、最近では毎年0.8から1.0%の割合で増加している。

地球上の炭素の循環

地球上で炭素はほとんどが岩石圏にあり、0.05%が生物圏、水圏、大気圏を循環している。内訳は、大気中（二酸化炭素）に760Gt、樹木な



◀水田はメタンの発生の源となる。

貯蔵が起こると大気中の二酸化炭素が減少し、気候の寒冷化が起こる。今から3億5920万年～2億9900万年前の石炭紀に、後者の例となる寒冷化が起こっている。石炭紀の気候は温暖で、海水面の低下により低地が広がり、ここではシダ類、針葉樹類、ソテツ等の純群落が広がり、地上を覆っていた。それらの植物の光合成により大量の二酸化炭素がバイオマスとして固定され、枯死して大量の木材が埋没し、その結果、炭素が土壌や水中に貯蔵、隔離されていった。こうして大気中の二酸化炭素濃度が減少し、気候は氷河時代へと移行していった。

土壌による炭素貯留

土壌中の有機物の消長は大気中の二酸化炭素濃度に直接的に影響し、気候変動の要因となってきた。このことから、寿命の長い土壌炭素プールをストックを増加させて安定的に貯蔵することで、温暖化の緩和に寄与することが期待される。管理による土壌炭素蓄積は、低コストで環境にやさしい気候緩和策である。

農耕地などの生態系を管理することで蓄えられる土壌炭素の量（シンク容量）は、自然生態系の農耕地への転換等により歴史上失われてきた土壌炭素の量（55～78Gt）と理論的にほぼ同量である。そのうち土壌炭素を増やす

ような管理により貯蔵（回復）できる炭素量は、理論上の最大容量の50～66%程度と考えられる。農地や復元した生態系における土壌炭素蓄積の速度は土壌の性質や気候により異なり、乾燥・温暖地方で0～150kg炭素/ha/年、湿潤・冷涼地帯では10～100kg炭素/ha/年である。この集積速度は20～50年持続する。

実際に土壌への炭素隔離（蓄積）を進める方法としては、土壌へのバイオマス（有機物）の添加、土壌のかく乱（土壌侵食等）の防止、土壌と水の保全、土壌構造の改善等が有効である。農法としては、かく乱を最小にするような耕うん、不耕起栽培、マルチ栽培、カバークロップの利用、アグロフォレストリー等がある。

こうした努力により実際に世界全体で可能となる炭素隔離の量は、計算の前提条件で異なるが、低い推定値で0.4～0.6Gt炭素/年、高い推定値で0.6～2.2Gt炭素/年である。土壌炭素隔離は量的にも時間的にも有限であるが、少なくとも脱炭素社会が実現するまでの対策として有効であろうし、農業生産そのものにも寄与することになる。

農業からのメタン、一酸化二窒素の発生と排出量削減

二酸化炭素に次いで温暖化への寄与が大きいメタンと一酸化二窒素は農業が主要な発生源であり、削減が義務付けられている。

(1) メタン：太古の時代からの炭素代謝産物

炭素に酸素原子が2個結合して最も酸化状態にある二酸化炭素に対し、水素原子が4個結合した最も還元状態にあるのがメタン（CH₄）である。二酸化炭素もメタンも有機物分解の最終産物であり、酸素がある酸化的条件で二酸化炭素が、酸素がない還元的条件でメタンが生成される。

メタン生成は、大気中に酸素がまだ存在しなかった時代に地球上の主要な炭素代謝経路として営まれていた、いわば太古の時代の生物代謝反応である。メタン生成を行う微生物がメタン菌で、アーキア^{注1)}に属する。メタン菌は、湿地や沼地、水田、動物の消化器官等に多数生息しており、そこがメタンの主要な発生源となっている。メタン菌自体は水田に限らず土壌中に普遍的に存在している。

近年の大気中のメタン濃度の上昇

注1)アーキア:現在の系統分類に基づく生物分類では、生物は細菌(Bacteria, “真正細菌”ともいう)、アーキア(Archaea)、真核生物(Eukarya)の3つのドメイン(系統)に大別される。アーキアは“古細菌”と呼ばれることもあるが、同じく細菌の意味を持つ細菌とは系統的に異なるため、“菌”や“細菌”の意味を持たない“アーキア”が使われることが多い。

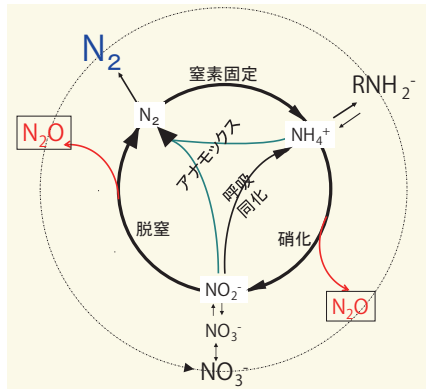
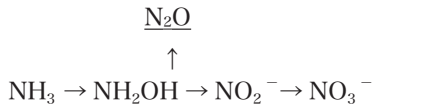


図-2 窒素の循環

脱窒反応ではすべてが N_2 まで還元されるわけではなく、一部は N_2O として大気中に放出される。脱窒菌によっては N_2O を N_2 に還元する酵素 (N_2O 還元酵素) を欠き、さらに同酵素は酸性で障害を受けるため、特に pH が低い条件下では N_2O が多く発生する (N_2O / N_2 比が増大する)。また電子受容体として NO_3^- の方が N_2O よりも優位なため、 NO_3^- が多量に存在する条件下では N_2O が多く発生する。

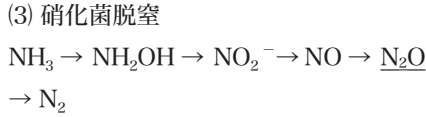
一方、アンモニアを硝酸に変換する硝化反応 (下記) において、中間産物であるヒドロキシアミンから、化学的分解で N_2O が生成する。

これ以外に、畑状態の土壌が低酸素ストレスに晒されると、硝化反応の副産物 (2) 硝化反応

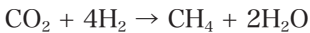


としてさらに一酸化二窒素が生成する。この反応は「硝化菌脱窒」と呼ばれ、硝化過程で生じる有毒な亜硝酸を無毒な一酸化二窒素と窒素ガスにまで還元的に変換する解毒反応である。

乾燥土壌では、この反応が一酸化二窒素生成の主要な経路であり、施肥によりアンモニアが多量に存在し、降雨により



は、水田面積の拡大、家畜の飼養頭数の増加、湿地の有機物分解の増大等が大きき要因である。水田を湛水すると次第に還元が進み、メタン生成が起こる。メタン生成の基質となるのは、水素と二酸化炭素、酢酸、ギ酸、メタノール等である。このうち水素と二酸化炭素からのメタンの生成は、以下の反応である。



H_2 は、有機酸などを発酵する他の細菌 (発酵菌) によって生産される。発酵菌は、 H_2 がメタン生成菌によって消費されることによって、発酵反応を一層進行させることができる。メタン菌は、基質である水素や酢酸などを巡って、鉄細菌や硫酸還元菌と競合関係にある。海洋は硫酸イオンが多いため、エネルギー的に有利な硫酸還元菌が優占し、メタンの発生は少ない。

日本の水田稲作では、生育期間中に一旦落水して土壌や水稻根に酸素を送る“中干”が慣行的に行われている。落水により土壌の酸化還元電位は上昇し、その結果メタン生成は抑制される。この中干の期間を前または後ろにさらに延長することで、メタンの発生量を概ね 20 ~ 30 % 削減することができる。この方法は環境保全型農業の地域特任取り組みとして、滋賀県などで認定されている。稲わらなどの新鮮有機物を春にすきこむとメタンの生成を増やすことになるため、堆肥化や、稲わ

らの場合には秋の時点でのすき込みが奨励される。

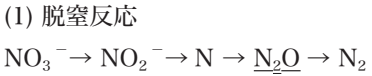
(2) 窒素の循環と一酸化二窒素

強力な温室効果ガスである一酸化二窒素排出の削減は、最大のオゾン層破壊物質であることから重要である。

生物にとって重要な元素である窒素は、地球上では窒素ガス (N_2) として大気中に存在している。一方、岩石圏には実質的な貯蔵はない。大気の主成分である窒素分子は安定 (不活性) なため、多くの生物はそのままでは利用することができず、一部の原核生物が行う生物的窒素固定でアンモニアに変換されることによって利用可能となる。アンモニアは硝化菌によって硝酸に酸化され、硝酸は脱窒により窒素ガスになり、大気に戻って循環が成立する。こうした基本的な窒素循環の中の硝化と脱窒の過程において、一酸化二窒素は発生する。

窒素の変換と地球上での循環を図-2 に示した。固定された窒素が大気プールに戻るの、脱窒とアナモックス反応^{注2)}による。

通常脱窒過程は、以下の逐次反応で硝酸から窒素ガスを生じる反応である。



脱窒反応の最終産物は N_2 で、 N_2O は一つ前の段階の中間産物であるが、

注 2) 近年発見された生物的窒素変換反応。アンモニアの酸化と亜硝酸の還元がカップルして N_2 を生成する。通常脱窒反応と違い炭素源が不要なこともあり、污水处理に有効である。

低酸素状態になった場合等に発生する。

このように、窒素の循環に重要な硝化と脱窒という基本的な変換反応に伴い一酸化二窒素は発生する。このため、化学肥料や有機物として投入される窒素の量が多いほど、一酸化二窒素の発生量も増加する。近年の大気中一酸化二窒素濃度の上昇は、工業的に空中窒素をアンモニアに変換するハーバー・ボッシュ法の発明により、固定窒素が生物圏（環境中）に多量に投入されることで窒素の循環過程のバランスが崩れた結果といえる。

農業からの一酸化二窒素の排出量を削減するための基本は、（作物が吸収できずに環境中に放出される）余分な

窒素肥料を減らすことである。このため、無駄な窒素肥料の施用を抑える適正施肥や分施、局所施肥など、一酸化二窒素発生量の削減に有効である。土壌中で肥料成分が緩やかに放出される緩効性肥料や、硝化抑制剤の利用も有効である。作物の窒素吸収を高めるための土壌酵素阻害剤等の開発も進められている。作物の側からは、窒素の吸収効率の良い作物の開発は重要である。

今後急増する世界の人口を養うためには大幅な食料増産が必要となるが、耕地面積の増大には限度がある。そのため生産性の向上が必要であり、窒素肥料はカギとなる。一酸化二窒素の生

成を始めとした窒素による環境負荷と、生産性の向上という相反する問題の解決は急務である。

地球温暖化に関する基本的な情報は環境省の下記サイト、農業の温暖化対策については農水省のサイトからの情報が参考になる。

（環境省）<http://www.env.go.jp/earth/ondanka/stop2015/>

<https://ondankataisaku.env.go.jp/communicator/download>

（農水省）<http://www.maff.go.jp/j/seisan/kankyoo/ondanka/>

統計データから

平成 28 年度アップランド用除草剤出荷量調査（植調協会）

アップランド用除草剤の推定使用面積を見ると、畑作・野菜花き・草地場面で約 250 万 ha、緑地管理が約 122 万 ha、果樹・桑・茶が 55 万 ha、芝が 36 万 ha となっている。この中では果樹等が前年比 76 と減少しているが、その他 3 分野ではいずれも増加している。

平成 28 年の普通畑・樹園地・牧草地などの畑耕地面積は約 204 万 ha に対し、畑作等と果樹等の除草剤推定使用面積は約 305 万 ha なので、畑耕地面積の 1.5 倍に相当する。また、ゴルフ場の面積が約 27 万 ha に対し、芝ではその約 1.3 倍の推定使用面積となる。このようにアップランド分野の管理に除草剤は欠かせない資材となっている。

それぞれの分野での使用薬剤

には特徴がある。畑作等では土壌処理剤と茎葉処理剤の比率が 4：6、芝では土壌処理剤 46%、茎葉兼土壌処理剤が 39%と、丁寧な雑草管理のためにバランスがとられている。一方、やや粗放的な管理が許される、果樹等では茎葉処理剤が 96%、非農耕地における緑地管理でも 92%と、これら使用場面での主役となっている。（K.O）

使用場面	処理法別薬剤	薬剤数	出荷量 kg・L	前年比	出荷金額 千円	前年比	推定使用面積 (単位: ha)	前年比
畑作・野菜花き 草地	土壌処理剤	60	7,298,540	98	12,552,923	102	1,081,135	105
	茎葉処理剤	44	5,163,296	108	13,023,415	108	1,440,421	108
	合計	104	12,461,836	106	25,576,338	111	2,521,556	110
果樹・桑・茶	土壌処理剤	5	180,679	98	165,950	97	5,738	96
	茎葉処理剤	18	2,894,728	77	5,399,649	65	531,383	75
	茎葉兼土壌処理剤	9	28,175	106	214,811	98	13,642	107
	合計	32	3,103,582	78	5,780,410	66	550,763	76
芝	土壌処理剤	42	804,015	94	5,448,638	85	165,559	86
	茎葉処理剤	28	564,026	107	1,506,495	119	54,910	106
	茎葉兼土壌処理剤	23	1,047,905	139	2,749,154	125	139,975	138
	合計	93	2,415,946	113	9,704,287	98	360,444	104
緑地管理 (非農耕地)	土壌処理剤	13	3,781,125	111	2,521,592	109	20,395	113
	茎葉処理剤	66	20,964,985	140	14,420,236	118	1,124,901	109
	茎葉兼土壌処理剤	71	11,751,133	107	8,017,386	106	74,593	107
	合計	137	36,497,243	125	24,959,214	113	1,219,889	108