

農耕地土壌からの温室効果ガスの排出抑制技術

農業環境技術研究所 物質循環研究領域

八木 一行

1. はじめに

農業は生態系におけるエネルギーと物質の収支を最大限に利用する人類必須の営みである。そこでは、原始的な焼き畑農業にせよ、化学肥料と農薬を投入し機械化された集約的農業にせよ、自然生態系の様々な循環を改変し、長い時間をかけて維持されてきたエネルギーと物質の平衡状態を別の収支状態へと移している。このことは、文明の基盤となる食料と繊維などの素材の供給を可能とした一方、化学物質の環境への負荷、水循環とエネルギー収支の改変など、現代の人類が直面している様々な問題を引き起こしている。

これらの問題のひとつとして、農業生態系からの温室効果ガス排出の問題が明らかにされ、現在の地球温暖化の一因として指摘されている。昨年公表された IPCC 第 4 次評価報告書 (AR4) ¹⁾によれば、全球における農業生態系からの温室効果ガス排出量は年間 5.1-6.1 Gt CO₂-eq (二酸化炭素換算量) で、人為起源の 13.5%を占めている (図 1)。このうち、最大の温室効果ガスである二酸化炭素 (CO₂) については、発生と吸収の収支は全球でほぼバランスしていると考えられている。しかし、別に算定されている森林からの温室効果ガス排出にも農地への土地利用変化を原因とするものが含まれていることから、農業の影響は森林分野にも及んでいると言える。加えて、生態系が関与する 2 つの温室効果ガス：メタン (CH₄) と一酸化二窒素 (亜酸化窒素：N₂O) について、農業生態系は、それぞれ、人為起源排出量の半分以上を占めており、重要な発生源となっている (図 2)。

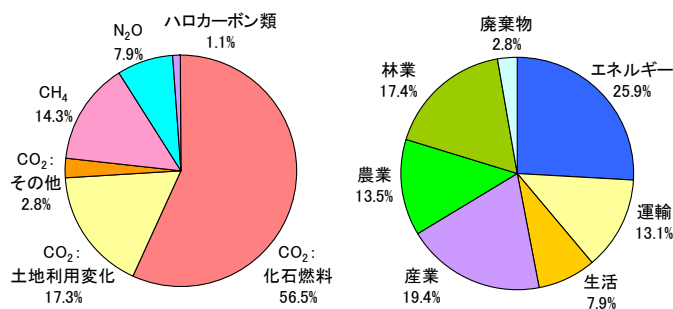


図 1 2004 年における人為的な温室効果ガス発生量の内訳。(左) ガス別；(右) セクター別。IPCC AR4 より作図。

2. 農耕地における CO₂ 発生と吸収

農耕地の二酸化炭素については、作物の光合成による大気中二酸化炭素の吸収と、作物の呼吸および土壌有機物や作物残渣の分解による発生のバランスから、吸収源となるか発生源となるか決定される。農耕地では、耕起を行うことにより土壌中での有機物分解を促進するとともに、収穫物として系外へ炭素を持ち出すことが多い。したがって、以前に森林や草地として蓄積され平衡状態にあった土壌有機物は、耕作に伴って減少し、二酸化炭素として放出される傾向にある。しかし、堆きゅう肥などの有機物を投入することにより、その減少が緩和され、土壌有機物としての蓄積量が増加する、すなわち、炭素貯留効果を示す場合がある。

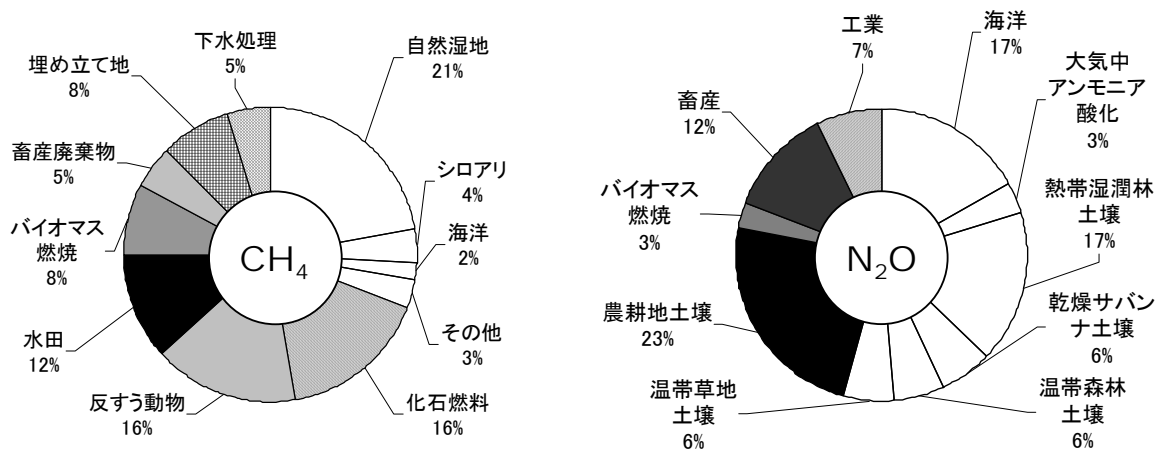


図2 地球規模でのメタン（左）一酸化二窒素（右）の発生源と発生量の内訳。白抜きは自然発生源を、パターンの入っているものは人為発生源をそれぞれ示す。

このような炭素蓄積に効果のある農業技術として、堆きゅう肥などの有機物の投入の他、不耕起や簡易耕起、輪作やカバークロップの導入の有効性が示されている。また、世界的には、森林や湿地から農地への土地利用変化を抑制することも重要である。IPCC AR4¹⁾では、このような農耕地土壌の炭素貯留機能には大きな期待が寄せられており、二酸化炭素換算で1トン当たり100米ドルの場合、2030年までに年間3870 Mt CO₂-eqの緩和ポテンシャルがあると推定されている。これは、2004年の人為温室効果ガス排出量の約8%に相当する。

3. 水田からのCH₄発生

水田では灌漑水により土壌を湛水することから土壌中の酸化物質が徐々に還元され、嫌気的な環境が発達した後、メタン生成菌と呼ばれる一群の絶対嫌気性古細菌の活動により有機物分解の最終生成物としてメタンが生成される²⁾。土壌中で生成されたメタンは、気泡として、田面水中を拡散して、または水稲を通して、のいずれかの経路で大気へと放出される。このうち、量的にもっとも重要なのは、水稲の通気組織を通して放出される経路である。一方、水田土壌中にはメタンを酸化分解する別の一群の細菌（メタン酸化菌）が存在し、一部のメタンはこれにより消費される。

全球における水田からのメタン発生量は年間20-100 Tgと推定され、人為起源発生量の5-30%程度に相当する。水田からのメタン発生は、1980年代より現場での計測が行われ、現在では、アジアを中心に世界の100を越える地点での計測結果が報告されている。これらの結果を取りまとめ、2006年IPCCガイドライン³⁾では、基準発生量(130 mg m⁻² day⁻¹)と水管理や有機物施用による発生量拡大係数が求められている。そのうち、有機物施用にともなうメタン発生量の増加比率を図3に示す。有機物施用によるメタン発生量の増加は、有機物の量とともに、種類により異なることが明らかである。なお、わが国の水田においても1990年代のはじめに全国調査が行われ、年間メタン発生量(33万トン)が推定されている。

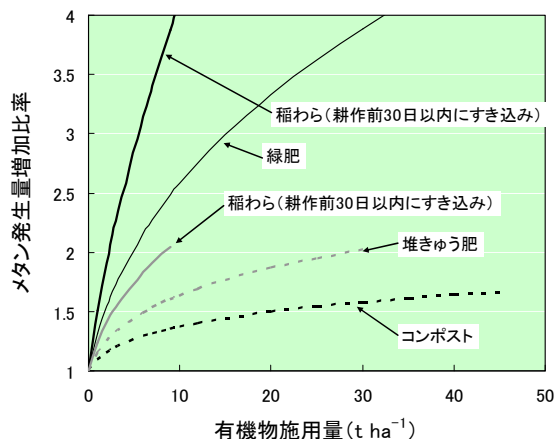


図3 各種有機物施用ともなう水田からのメタン発生量の増加

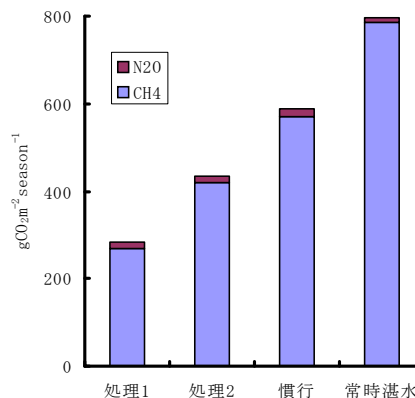


図4 中干し期間の違いが水田からのメタン発生量に及ぼす影響。処理1：中干し4週間；処理2：中干し3週間；慣行：中干し2週間。

水田からのメタン発生抑制方策として、中干しや間断灌漑による水管理、稲わらの堆肥化や非湛水期間での分解を促進する有機物管理、肥料または資材の使用、土壌改良など、候補となる技術が数多く提案され、その多くは効果を実証されている。これらのうち、水管理と有機物管理は早期の実用化が期待出来る技術である。福島県農業総合センターにおいて行われた試験では、中干し期間を慣行（2週間）より1週間開始を早くして延長することにより、水稻収量に影響を与えず、メタン発生量を26-51%削減することができた。中干し期間を2週間延長した場合は、メタン発生量をさらに削減（53-72%）できたが、水稻収量は約10%程度減少した⁴⁾。また、新潟県農業総合研究所における試験から、基盤整備による土壌浸透能改善でもメタン発生を大幅に削減できることが示されている⁴⁾。水管理と有機物管理によるメタン発生削減は中国、インドネシア等、他のアジア諸国の水田においても確認されている。平成20年度からの農林水産省事業では、京都議定書第一約束期間におけるわが国の温室効果ガス排出削減に貢献することを目標に、福島県で示された中干し期間延長によるメタン発生抑制技術を全国的に実証・普及することが計画されている。

4. 施肥窒素からのN₂O発生⁵⁾

作物生産に必要な化学肥料や有機物として農耕地に施用された窒素は、土壌中で微生物による形態変化を受け、NH₄-NからNO₃-Nへ（硝化）、NO₃-NからN₂へ（脱窒）と変換される。N₂Oは土壌中での硝化および脱窒の両方の過程で副生成物として生成され、大気へ放出される（図5）。

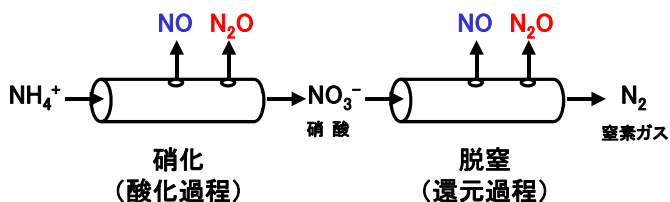


図5 微生物（硝化細菌、脱窒細菌）による一酸化窒素(NO)と一酸化二窒素(N₂O)の生成の「穴あきパイプモデル（hole-in-the-pipe model）」⁶⁾

農耕地からの N_2O 発生量は、一般に、施用した窒素量に伴って増加するので、施用窒素量に対する N_2O -N 発生量の割合である排出係数が発生量の見積もりに用いられる。2006年 IPCC ガイドライン³⁾では、標準的な排出係数（デフォルト値）として、1.0%が提案されている。しかし、わが国における観測データは、多くの場合、発生係数はこの値より低い。茶園土壌等の一部の例ではできわめて高い発生が見られることを示している（表1）⁷⁾。これらの研究結果から、わが国農耕地からは窒素換算で年間4,420トンの N_2O 発生が見積もられている。また、 N_2O 発生プロセスとして、農耕地土壌から直接大気へ放出される以外に、施肥窒素が農業地帯の地下水や河川水に流出した後に、脱ガスで N_2O が放出される、いわゆる間接発生が指摘されている。

農耕地土壌から発生する N_2O の抑制技術については、別の環境問題である地下水への硝酸性窒素溶脱の問題と共通する点が多く、作物による窒素利用効率の向上や硝化・脱窒の抑制等にポイントを置いた技術の開発が有効である。そのための技術としては、最適な窒素施肥量と分施・局所施肥、適切な有機物施用など施用方法の改善設計が基礎となる。これらに加え、緩効性肥料や硝化抑制剤・ウレアーゼ阻害剤など新しいタイプの肥料の使用が N_2O 発生抑制に効果のあることが報告されている（図6）⁸⁾。これらの技術を用いて、土壌の環境容量を超えずに高い収量を維持するための窒素施肥体系を地域ごとに示し、広く普及させる努力が、食糧生産と環境保全の調和のために必要である。

5. 農業生態系からの温室効果ガス排出削減の可能性

以上示すように、農業生態系ではさまざまな発生源から、 CO_2 、 CH_4 、 N_2O の3つの重要な温室効果ガスが発生している。それらの地域的、あるいは全球的発生量について、農業生態系の多様性に起因する定量評価の不確実性を改善する余地はあるものの、地球温暖化に対する影響の大きいことは明らかである。さらに、農耕地と畜産からの発生抑制技術の候補は多数提案され、農耕地における水管理（水田）、有機物管理、施肥管理など、多くの技術について、現地試験等から大きな削減効果が確認されている。また、畜産において

表1 わが国の農耕地土壌からの N_2O 排出係数

| 排出源区分* | 作物種 | 排出係数 (kg N_2O -N kg N^{-1}) | 不確実性 (kg N_2O -N kg N^{-1}) | 出典・根拠 |
|--------------|--------|-------------------------------------|-------------------------------------|------------|
| 合成肥料および有機質肥料 | 水稲 | 0.31% | ±0.31% | 文献1,2 |
| | 茶 | 2.90% | ±1.8% | |
| | その他の作物 | 0.62% | ±0.48% | |
| 作物残渣 | | 1.25% | 0.25%-6% | IPCCデフォルト値 |
| 間接排出(大気沈降) | | 1.00% | ±0.5% | IPCCデフォルト値 |
| 間接排出(溶脱・流出) | | 1.24% | 0.6%-2.5% | 文献1,3 |

*有機質土壌の耕起については、IPCCデフォルト値(排出係数: 8 kg N_2O -N $ha^{-1} yr^{-1}$; 不確実性: 1-80 kg N_2O -N $ha^{-1} yr^{-1}$)の使用を提案した。

文献1: Akiyama, H., Yan, X., and Yagi, K.: Soil Sci. Plant Nutr., 52, 774 (2006)

文献2: Akiyama, H., Yagi, K., and Yan, X.: Global Biogeochem Cycles., 18, GB2012 (2005)

文献3: Sawamoto, T., Nakajima, Y., Kasuya, M., Tsuruta, H., and Yagi, K.: Geophys. Res. Lett., 32, L03403 (2005)

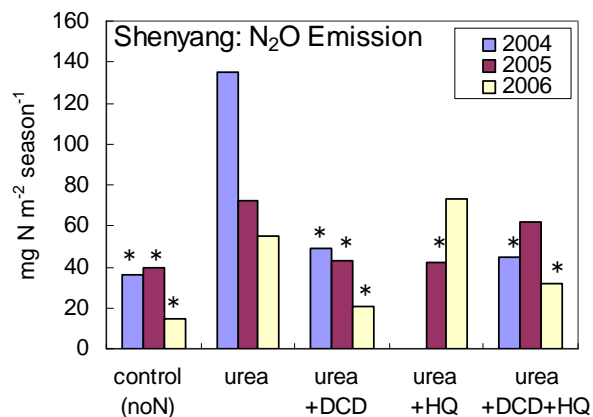


図6 化学肥料（尿素）に硝化抑制剤（DCD）とウレアーゼ阻害剤（HQ）を添加した場合の N_2O 発生量の変化。中国遼寧省瀋陽のトウモロコシ畑における試験結果。

表2 農業生態系からの温室効果ガス発生量削減策評価

| 対象ソース | 水田からのCH ₄ | | 化学肥料からのN ₂ O | 反芻家畜からのCH ₄ | 畜産廃棄物からのN ₂ O | |
|--------------------|------------------------------|--------------------|-------------------------|------------------------|--------------------------|--------------|
| | 水管理 | 有機物管理 | 緩効性肥料 | 飼養改善 | ふん尿処理 | 飼養改善 |
| 削減技術 | | | | | | |
| 対象面積等 | アジアの灌漑水田 | アジアの水田 | アジアの化学肥料 | アジアの反芻家畜 | 日本の畜産業 | 東南アジアの養豚 |
| 削減率 | 35~61% | 16~30% | 30~40% | 10~15% | 20% | 17% |
| 削減ポテンシャル (Mt C/yr) | 日本:0.6 アジア:27.3 | 日本:0.5 アジア:12.8 | 日本:0.9 アジア:2.0 | アジア:90 | 日本:0.2 | 東南アジア:4.1 |
| リーケージ | N ₂ O発生 世界:2.7 | 無 | 無 | 無 | NH ₃ 発生 | 無 |
| コスト | 少~中 (インフラ整備) | 少 (管理コスト) | 少 (肥料コスト) | 少 (飼料コスト) | 少 (設備コスト) | 少 (飼料コスト) |

表3 農業生態系からの温室効果ガス発生量削減策評価：ケーススタディ

| 対象ソース | 水田からのCH ₄ | | 化学肥料からのN ₂ O |
|-----------------------------------|------------------------------|--|---|
| | 水管理 | | 緩効性肥料 |
| 削減技術 | 中干し期間の延長 (1週間→2週間) | | 硝化抑制剤資材の添加 |
| 対象面積等 | 日本の水田の10% | インドネシアの水田 13,000 ha | 中国遼寧省トウモロコシ畑の10% |
| 削減率 | 35% | | 40% |
| 削減ポテンシャル (10 ³ t C/yr) | 60 | | 14 |
| リーケージ (10 ³ t C/yr) | 6 | | 1 |
| コスト (円/t C) | 0 | | 3,000 |
| | 灌漑水代金は年間契約のため増減無し。労働力の増加も無し。 | コンクリート水門設置費用(6,200円/30 ha)、および水管理の労働力(1,600円/30 ha/yr)。CDM事業としての見積もりもを行っている。 | 資材代金(390円/ha)必要だが、追肥を省けることにより、労働力(300円/ha)節約。 |

も飼養管理、ふん尿処理などの有効性が示されている。表2に、わが国で研究の進んでいる削減策のポテンシャルについて示すが、アジア地域での削減が進んだ場合には大きなポテンシャルが見込まれる。同時に、コスト的にも有利だと考えられる。また、表3に水管理による水田からのCH₄削減（日本とインドネシア）と硝化抑制剤入り資材による化学肥料からのN₂O削減（中国）に関するケーススタディの結果を示すが、いずれの場合も炭素1トンあたり数千円以下のコストと評価されている。

しかし、これらの技術が温室効果ガス排出削減のために実際の農業の場面で適用された事例は、現時点ではきわめて少ない。京都議定書において、農耕地を炭素吸収源として選択した国はカナダ等4か国のみである。また、CH₄とN₂Oの削減については、計画している国はあるものの、実際の適用例はまだ無いと思われる。

農業生態系からの温室効果ガス発生量削減技術が、未だ、実用化段階に移されていない原因のひとつには、発生削減にともなう経済性評価が不足していることが挙げられる。多くが家族経営である農業では、コストと労力を考慮に入れ、トータルの収益と労働性が改善される技術でなければ普及の見込みはきわめて小さい。そのために、個々の技術について、各地域で経済性評価を細かにを行い、農家が受け入れられる可能性を提示することが必要である。加えて、そのような技術を推進するための政策的支援が必要になる。

また、農耕地や家畜そのものに対する発生削減技術の評価は行われているものの、農業生態系や地域全体での評価が十分ではないことも今後の課題である。この問題に対し、技術のための新たなエネルギー投入や資材または飼料の生産と使用などを含めた、システム全体の収支を取り扱うライフサイクルアセスメント(LCA)手法の導入が求められている。たとえば、その処理の様々な場面で温室効果ガス発生の可能性のある畜産廃棄物については、地域的な畜産農家と耕種農家の連携を包括的に評価し、最も温室効果ガス発生が少なく、かつ他の環境負荷を増加させず、生産性や農家の経済性も満たすような最適な解を求める必要がある。近年、生産が進んでいるバイオ燃料についても、その化石燃料削減効果と燃料作物栽培に伴う温室効果ガス発生増加の可能性を合わせて評価すべきである。

もうひとつの問題は、先進国での農業分野からの温室効果ガス排出割合は比較的 low、その削減ポテンシャルの多くは発展途上国にあることである。わが国の温室効果ガス排出インベントリーに占める農業分野の割合は2%にすぎない。一方、同じ水田耕作を基礎と

する農業体系を持つ熱帯アジアでは、インドで 28%、タイで 35%など、農業分野の占める割合がきわめて大きい。特に広大な農耕地をもち、家畜頭数の多大な国では、農業技術の適用による排出削減策は大きな貢献が可能である。このような国においては、その適用について、持続的開発政策と一致させることにより、削減の可能性をいっそう前進させると予測される。京都議定書において設定されているクリーン開発メカニズム（CDM）は、新たな開発援助のツールとして活用出来る可能性がある。

IPCC AR4¹⁾には、農業分野における温室効果ガス排出削減策が、エネルギー、運輸、森林など非農業分野のものと同様に競合出来ることを明示している。また、その利点として、長期間の効果が期待出来、全体として大きな貢献が可能であることが挙げられている。農業分野における新たな技術開発は、有望な温室効果ガス排出削減策であると同時に、今後の農業のかたちとして求められている環境保全型農業の方向とも一致する。地球温暖化問題への対策を迫られている現在こそ、適切な土地利用を可能にする国際交渉の推進や、環境と調和した将来のあるべき農業の姿を構築するための大きなチャンスが訪れたのかも知れない。

引用文献

- 1) IPCC (2007): IPCC Fourth Assessment Report (AR4): Climate Change 2007, Cambridge University Press. <http://www.ipcc.ch/>
- 2) 八木一行 (2004): 大気メタンの動態と水田からのメタン発生. 「農業環境研究叢書 第 15 号, 農業生態系における炭素と窒素の循環」, p. 23-50, 農業環境技術研究所
- 3) IPCC (2006): IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. <http://www.ipcc.ch/ipccreports/methodology-reports.htm>
- 4) 平成 17 年度環境省地球環境研究総合推進費課題 S-2 テーマ 3a 報告書 (2006)
- 5) 八木一行 (2006): 温室効果ガスの発生とその評価. 肥料の事典, 358-365, 朝倉書店
- 6) Firestone, M.K. and Davidson, E.A. (1989): In Exchange of trace gases between terrestrial ecosystem and the atmosphere, pp. 7-21, John Wiley & Sons Ltd.
- 7) Akiyama, H., Yan, X., and Yagi, K. (2006): Soil Sci. Plant Nutr., 52, 774
- 8) 平成 18 年度環境省地球環境研究総合推進費課題 S-2 テーマ 3a 報告書 (2007)