

農耕地土壌からの温室効果ガスの排出抑制と作物生産

福島県農業総合センター 生産環境部
環境・作物栄養科長 三浦吉則

1. はじめに

農耕地土壌から発生する二酸化炭素、メタン、亜酸化窒素等の温室効果ガス排出量は、土地管理形態、施肥、水管理、耕起法、有機物施用等により変動するが、場合によってはそれらのガス排出がトレードオフの関係になることも多く、総合的な管理手法の確立を困難にしている。更に、作物の生産性やコスト、あるいは長期的に見た土壌肥沃度の維持、炭素蓄積まで考慮すると最善の管理法の選択は非常に難しい。

ここでは、水田からのメタン発生抑制のための各種稲わら処理法を提案し、福島県農業試験場で実施したデータを基に、それぞれのメタン発生抑制効果とともに他の微量ガス発生、地域性、農家への普及、地力維持等についても考察し、抑制技術の総合的な評価を試みた。

2. 各種稲わら処理によるメタン発生等への影響

(1) 稲わらの腐熟度とメタン発生 (図1、図2)

堆肥による有機物施用はメタン発生の増大を最小限に抑えることが多くの研究事例で明らかになっている。そこで、腐熟度の異なる稲わらについて、その有機物組成を調べるとともに、水稻を生育させた湛水土壌に炭素量で同量添加したときのメタン発生をポット試験により調査した。その結果、稲わらの腐熟が進むにしたがい稲わら中の糖、ヘミセルロース、セルロース含量は低下し、完熟堆肥では未処理の稲わらに比べ、ヘミセルロース、セルロース画分は約 1/6 に、糖画分は約 1/3 にまで減少した。また、添加した稲わらの腐熟度とメタン発生に密接な関係がみられ、メタン発生の著しかった未処理の稲わらに比較し、稲わらの腐熟が進むにしたがい発生量は減少した。完熟堆肥施用での発生量は少なく有機物無施用とほぼ同量であった。これらのことから、稲わらを施用した土壌からのメタン発生を軽減するためには、施用前に稲わらをできるだけ腐熟させておくことが重要であることが明らかに

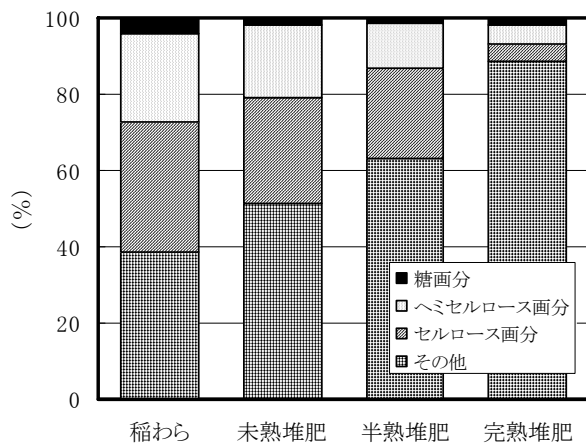


図1 腐熟度の異なる稲わら堆肥の炭水化物画分組成

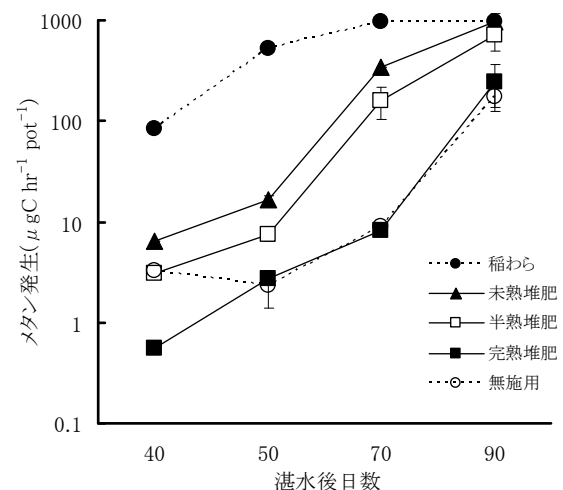


図2 腐熟度の異なる稲わら堆肥の施用によるメタン発生への影響

なった。

(2) 稲わら中有機成分のメタン発生への効果 (図3)

稲わらに含まれる有機成分がメタン発生にどのように関与しているかについてポット試験により調査した。稲わらの主要な有機成分である糖、ヘミセルロース、セルロース、リグニン等がメタン発生に及ぼす影響をみるために、各画分に相当する純粋物質を稲わらに含まれる相当量分を水田土壌へ添加した。その結果、メタン発生に関与する炭水化物画分のセルロースやヘミセルロースは、基質としてメタン総発生量に関与し、糖は水稻生育初期のメタン発生のプロモーターとして関わっていることが明らかになった。このことから、施用する稲わら中の糖、ヘミセルロース、セルロース含量を低下させる処理がメタン発生を減少させるものと推察された。

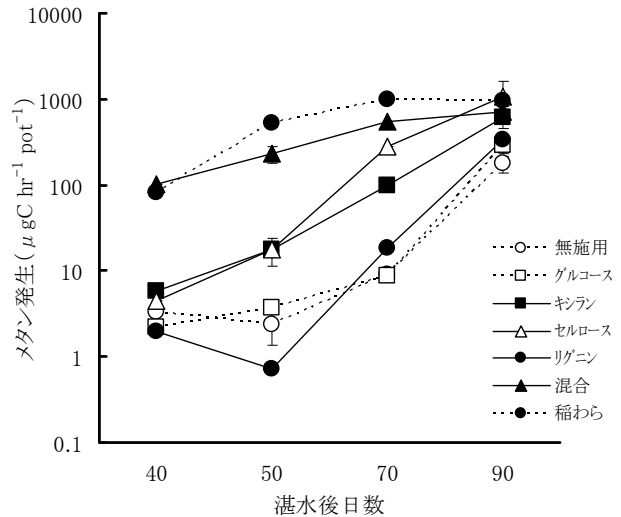


図3 稲わら構成成分の純粋物質の施用によるメタン発生への影響

(3) 稲わらの鋤込み処理のメタン発生への影響 (表1、図4)

稲わらはコンバインの導入により秋の収穫と同時にほ場に刈捨てされているのが大半である。この現状から稲わらを落水期間中、土に鋤込むことにより酸化的分解を促進し、翌年の水稻栽培期間中のメタン発生抑制効果を検討した。処理区は、①稲わら 6t ha⁻¹を秋に鋤込み、鋤込み処理時に腐熟促進剤として石灰窒素 0.5kgN ha⁻¹を添加 (秋鋤込み+石灰窒素区)、②稲わら 6t ha⁻¹を秋に鋤込む (秋鋤込み区)、③秋に稲わら 6t ha⁻¹をほ場表面に刈捨てで放置し、翌年春に鋤込む (秋表面施用春鋤込み区)、④収穫後稲わらを室内に保存し、春に 6t ha⁻¹を鋤込む (春施用春鋤込み区)、⑤対照区として稲わら無施用 (稲わら無施用区)を設定した。秋鋤込みは 11月中旬に、春鋤込みは 4月中旬に実施した。水稻栽培期間中のメタン発生と春鋤込み時の稲わらの有機物組成等について調査した。その結果、メタン総発生量は秋鋤込み区が秋表面施用春鋤込み区に比べ約 40%減少

表1 稲わら鋤込み処理によるメタン総発生量

鋤込み処理法	メタン総発生量(gCH ₄ m ⁻²)				同左比
	前期	中期	後期	合計	
稲わら無施用	1.1	1.1	0.6	2.8	26
秋鋤込み+石灰窒素	0.8	1.5	1.1	3.4	31
秋鋤込み	1.0	3.0	2.2	6.2	57
秋表面施用+春鋤込み	4.7	5.3	0.9	10.9	100
春施用 春鋤込み	12.4	16.9	1.0	30.3	278

備考) 前期:5/18~7/8、中期:7/9~8/11、後期:8/12~9/14

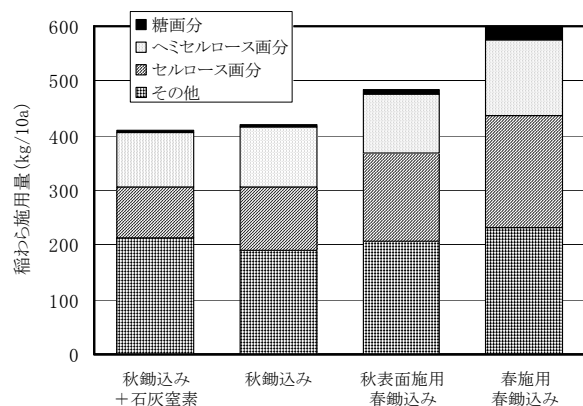


図4 鋤込み処理による稲わらの炭水化物画分への影響

した。さらに石灰窒素を添加することにより秋表面施用春鋤込み区に比べ約 70%の減少となり、稲わら無施用区のメタン発生レベルとなった。稲わらの炭水化物画分については、糖画分で秋鋤込み区が秋表面施用春鋤込み区に比べ約 40%減少し、石灰窒素の添加で約 50%の減少となった。セルロース画分については秋鋤込み区が秋表面施用春鋤込み区に比べ約 30%減少し、石灰窒素の添加で約 40%の減少となった。これらのことから、稲わらを秋のなるべく早期に鋤込むことがメタン発生の抑制に有効であることが明らかになった。

(4) 堆肥化過程からのメタン、亜酸化窒素発生 (表 2)

稲わらの堆肥化によるメタン発生抑制を評価するためには、堆肥化過程からのメタン発生を確認する必要がある。したがって、堆肥化過程からのメタン発生について、簡易に容積 140L のポリバケツを用い検討した。堆肥作成には腐熟促進剤の添加も想定し、亜酸化窒素発生についても測定した。その結果、堆肥化過程からのメタン発生が確認されたが、発生量は稲わらを 6t ha⁻¹秋鋤込み施用した水田からの発生量の約 1/10~1/100 量に相当する少ない発生であった。また、亜酸化窒素については、腐熟促進剤を添加した区で発生がみられ、その量は腐熟促進剤に含まれる窒素の 2.0~8.0%に相当した。したがって、堆肥化過程からのメタン発生については、発生がみられるもののその量が少ないことから、メタン発生抑制のための稲わらの堆肥化処理は有効であると判断された。ただ、堆肥作成にあたり腐熟促進剤添加の際には、亜酸化窒素について考慮する必要があると考えられた。

表2 稲わらの堆肥化過程からのメタン、亜酸化窒素発生量

	無窒素	+石灰窒素	+硫安	+鶏ふん	測定期間	実施年
CH ₄ 発生量 (mgC kg ⁻¹)	364 (0.10%)	239 (0.07%)			108日	1992
	346 (0.09%)	143 (0.04%)	159 (0.04%)	204 (0.06%)	127日	1993
N ₂ O発生量 (mgN kg ⁻¹)	-0.4 -	320 (8.0%)	135 (3.4%)	83 (2.0%)	127日	1993

注)カッコ内は、稲わらの炭素のうちメタンとして発生した割合(%)および添加した窒素のうち亜酸化窒素として発生した割合(%)

(5) 稲わらの燃焼からの微量ガス発生 (表 3)

わら焼きは、条例等の規制があるものの、現場では行われているのが現状である。そこで、稲わらの燃焼から発生するガスとしてメタンとともに二酸化炭素、一酸化炭素、亜酸化窒素の検討を行った。測定は送風機を装着したビニールハウスを用いた、オープンチャンバー法で行った。その結果、1ha あたり 6t の稲わらが排出されると仮定すると、稲わらの秋鋤込み施用水田の発生量に匹敵する 13~25kg CH₄ ha⁻¹のメタンがわら焼きによって発生することが明らかとなった。

表3 稲わら燃焼からの各種ガスの発生量

	二酸化炭素	一酸化炭素	メタン	亜酸化窒素
	(gC kg ⁻¹ 稲わら)			(gN kg ⁻¹ 稲わら)
稲わら1	303 (81%)	19 (5%)	1.60 (0.43%)	0.084 (1.50%)
稲わら2	194 (57%)	30 (9%)	3.08 (0.90%)	0.066 (1.16%)

注)稲わら1:収穫後風乾(水分10.6%)、稲わら2:1か月ほ場に放置(水分14.2%)。

カッコ内は発生したガスの稲わらの炭素や窒素に占める割合。

また、亜酸化窒素発生量は同様の算出法で 0.4~0.5kg N ha⁻¹ と、湛水期間中の水田からの発生量とほぼ同量であった。さらに、大気中のメタンの滞留時間と関連する一酸化炭素発生量がメタンの 10 倍量に達した。これらのことから、稲わらの燃焼は、メタンに限らず亜酸化窒素や一

酸化炭素についても無視できない量が発生し、さらに有機物として土壤に供給されないことから地力維持の面からも不適切な稲わら処理法であると判断された。

3. 稲わら処理法メタン発生抑制等への評価

水田からのメタン発生抑制を考慮した稲わら管理法として、堆肥化や鋤込み、燃焼の有効性を検討した結果、全ての管理法について抑制効果が認められた。しかし、総合的評価のためにはメタン発生抑制効果を管理法間で比較する指標が必要である。そこで、稲わら中の炭素のどれくらいがメタンとして発生したか、その比率による比較を試みた。発生したメタンの稲わら炭素に占める割合を表4に示した。

表4 発生したメタンの稲わら中炭素に占める割合

	炭素割合(%)
*稲わら施用水田 春施用春鋤込み	8.3
(鋤込み処理) 秋表面施用春鋤込み	3.1
秋鋤込み	1.3
稲わらの堆肥化過程	0.04~0.09
稲わらの燃焼過程	0.43~0.90

*)水稲生育期間中の総発生量から算出

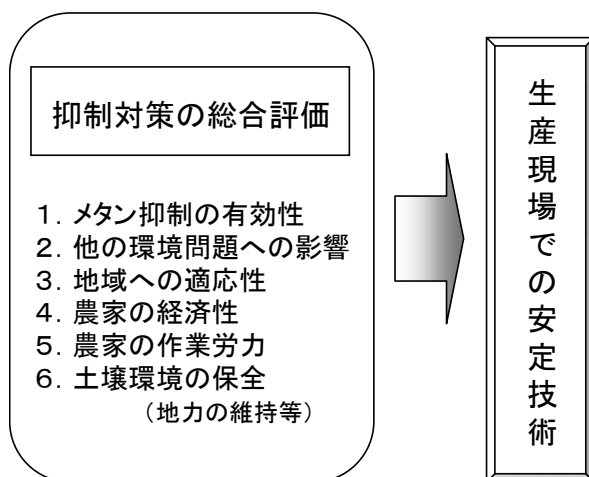


図5 水田からのメタン発生抑制技術の評価

物施用区での高まりが概ね確認された。

堆肥の施用については、完熟堆肥施用を前提とし水稲栽培期間でのメタン発生量は有機物無施用区に比較して増大効果がなかったことから増大分を0として評価した。さらに堆肥化過程から発生したメタンの稲わら炭素の割合は0.04~0.09%と稲わら処理の中では最も低かったことから、メタン発生抑制としては最も有効と判断された。また、堆肥の施用は地力維持等の土壤環境の保全や水稲収量の安定、土壤炭素蓄積につながることからその有効性は高いと考えられた。しかし、農家の作業労力の面から、近年は堆肥をつくり水田へ還元することが減ってきている。さらに、堆肥作成時に腐熟促進のために窒素を添加すると高い割合で亜酸化窒素が発生することから、堆肥作製の際には窒素無添加が望ましく、添加する場合には亜酸化窒素発生抑制のための検討が必要と考えられた。

また、図5で示すように、稲わら処理法はメタン発生抑制の有効性のみで評価されるものではなく、メタン発生以外の環境問題への影響、地域への適用性、農業にかかる費用や作物収量等の農家の経済性や農家の作業労力、地力維持等の土壤環境保全などについても考慮されるべきであり、最終的には農業現場に受け入れられ持続性のある技術でなければならない。

水田土壤の肥沃度及び土壤炭素の蓄積を表すものとして、有機物を30年間連用した水田のデータを図6と表5に示した。図6は有機物連用30年目に無肥料で栽培した水稲の収量で、化学肥料区に対して堆肥(稲わら堆肥)や稲わら施用により増加がみられた。この収量増加は土壤肥沃度の増加を示すもので、表5の作土層の可給態窒素の状況からも見て取れる。さらに、表5では土壤への炭素の蓄積傾向が全炭素の化学肥料区に比しての有機

物施用区での高まりが概ね確認された。

鋤込み処理については、秋鋤込みが湛水前の稲わらの酸化分解が促進され、メタン発生にも明確な抑制効果があることが明らかになった。収穫後直ぐに鋤込むことや鋤込み時に石灰窒素等の腐熟促進剤を添加することにより、メタン発生抑制の効果はさらに増すと考えられるが、鋤込み時に稲わらの腐熟促進のために窒素を添加した場合、堆肥化と同様に亜酸化窒素の発生に注意する必要がある。ことから、稲わらの鋤込み処理は、地力維持や収量の安定、土壌炭素蓄積に加え、大規模化、省力化のうえからも農業の現状に適合しており、農家への普及性が高いメタン発生抑制対策であると言える。ただし、積雪地域、湿地地帯では農家は春作業を円滑に実施するために鋤込みを避けるので堆肥施用できる体制を整えることが必要となる。

燃焼処理については、稲わらの燃焼過程に伴い発生するメタンの稲わら炭素に対する割合は0.43~0.90%と、秋鋤込み処理区の水稲栽培期間中のメタン発生量に比べ低いものの無視できない量であった。今回の実験では供試した稲わらが、風乾したものと、1ヶ月間ほ場に放置したものの2種のみであり、燃焼方法も約15cmの高さに積むなど、燃焼しやすい条件で実施したことから、実際のほ場での燃焼の際には発生したメタンの炭素割合はさらに高まる可能性があると思われる。また、メタン以外の微量ガスとして亜酸化窒素、一酸化炭素、二酸化炭素の発生も認められ、亜酸化窒素発生量は0.4~0.5kgN ha⁻¹ (稲わら6t ha⁻¹相当量)と見積られ、湛水期間中の水田からの発生量に匹敵する量であった。一酸化炭素は大気中のメタン濃度の増加と関連しており、その発生量はメタンの10倍量に達した。さらに、燃焼により稲わら中の炭素が消失してしまうことから、有機物として土壌へ供給されなくなってしまふ。これらのことから、稲わらの燃焼はメタンに限らず亜酸化窒素や一酸化炭素についても無視できない量を発生しており、さらに地力維持の面などを考慮しても不適切な稲わら処理法であると判断された。

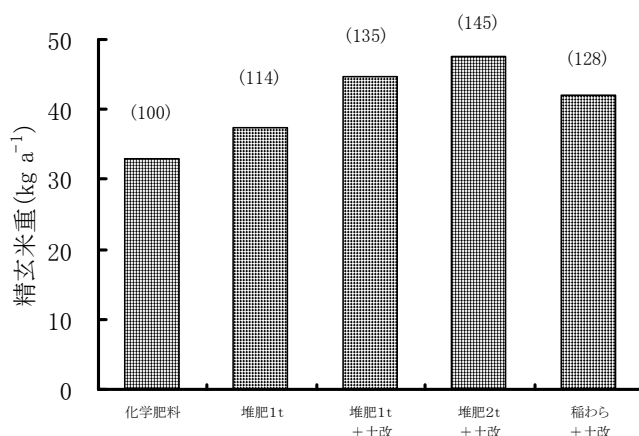


図6 無肥料栽培による水稲収量
注) カッコ内は化学肥料区を100とした収量比

表5 有機物30年連用水田土壌の化学性

区名	層位 (cm)	全炭素 (%)	全窒素 (%)	可給態N (mg/100g)
化学肥料	0-10	1.32	0.128	10.9
	10-20	1.28	0.119	4.6
堆肥1t	0-10	1.53	0.151	12.5
	10-20	1.51	0.150	5.9
堆肥1t + 土改	0-10	1.51	0.156	12.6
	10-20	1.04	0.116	6.1
堆肥2t + 土改	0-10	1.83	0.180	14.5
	10-20	1.65	0.171	6.2
稲わら + 土改	0-10	1.52	0.154	12.1
	10-20	1.45	0.146	6.7

注) 全炭素、全窒素: 乾式燃焼法
可給態N: 湛水静置培養法

4. おわりに

水田は温室効果ガスであるメタンの主要な発生源であるものの、多くの環境保全機能や連作障害が起こらない安定した生産性を有する持続的な生態系であると言える。この驚異的な生態系を保全しながらメタン発生抑制技術を構築することが、持続的な農業を実現するうえ

でも重要なことと考えている。ここでは、水田の稲わら処理法についてメタン発生抑制を主として、地域や期間、調査項目を限定した断片的なデータを基に自分なりの考えを述べたが、評価に供されるデータが集積し、温室効果ガスの排出抑制と作物生産とが相反しない永続的な普及技術が創出されることを願っている。

参考文献

- 1) Miura, Y. and Kanno, T. (1997) Emissions of trace gases (CO₂, CO, CH₄, N₂O) resulting from rice straw burning. *Soil Sci. Plant Nutr.*, **43**: 849-854
- 2) 三浦吉則: 地力向上のための水田への稲わら還元に伴うメタンガス発生の抑制技術. 土肥誌, **70**, 269-270 (1999)
- 3) 三浦吉則: 水田からのメタン発生の実態と抑制のための稲わら管理に関する研究. 福島農試特研報, **7**, 1-38 (2003)
- 4) 三浦吉則 (2007) 稲わら堆肥、稲わら長期連用水田における蓄積地力窒素による水稻の増収効果、農業および園芸、**82**: 1198-1202