

# 積雪寒冷地水田からの 温室効果ガス(メタン)削減技術

山形県立農林大学校 准教授 塩野宏之

## 地球温暖化と温室効果ガス

国連の気候変動に関する政府間パネル (IPCC) が2021年8月9日に公表した報告書では「人間が大気や海洋、陸域を温暖化させてきたことには疑う余地がなく」「10年に一度とされる異常気象の発生頻度も以前に比べ増加している」としている。温暖化は、大気中の二酸化炭素 (CO<sub>2</sub>)、メタン (CH<sub>4</sub>)、一酸化二窒素 (N<sub>2</sub>O)、フロンなどの濃度が上昇することで引き起こされ、これらのガスは「温室効果ガス」と呼ばれている。また、2020年9月に就任した菅義偉首相は、臨時国会での所信表明演説のなかで「2050年までに温室効果ガスの排出を全体としてゼロにする、すなわち2050年カーボンニュートラル、脱炭素社会の実現をめざす」ことを宣言しており、農業を含む各分野から発生する温室効果ガスの削減対策をこれまで以上に進めていく必要がある。農業分野から発生する温室効果ガスで重要なのが「メタン」である。

## 温室効果ガスである「メタン」

メタンは、自然湿地、化石燃料やバイオマス燃焼によって発生するほか、酸素のない「嫌気状態」でメタン生成菌が活動することで発生し、牛など反芻動物の「げっぷ」にも含まれる (表1)。

水田では、湛水されて酸素量が少なくなった土壤中で発生し、水稻体を通じて大気中に放出される。メタンは、単位重量当たりの温室効果ガスへの影響 (地球温暖化係数) が二酸化炭素の約25倍大きいことから、温暖化への影響が大きいガスといえる。また、国内の水田をみると、特に、東北地域の水田からのメタン発生量が多くなっており、東北地域の水田面積は国内水田の25%程度だが、メ

タン発生量は国内水田の54%を占めるとされている (Hayano *et al.* 2013)。

## 東北地域の水田から発生するメタン

では、なぜ東北地域の水田から発生するメタンは、ほかの地域に比べ多いのだろうか？ 理由のひとつは、寒冷な東北地域では冬に積雪があり、収穫後から翌年の春にかけて稲わらの分解が進まないことが挙げられる。酸素が十分にある“好氣的な”条件下で翌春までの稲わら分解が進めば、湛水され、水稻の作付け期間中に分解される稲わら量は少なくなるため、メタンの発生量も少なくなる。しかし、特に日本海側の東北地域では、9~10月の水稻収穫時にコンバインで裁断され、圃場に散布された稲わらは翌春まで放置される (写真1)。冬期間は低温のため、稲わらを分解する土壌微生物の活動が鈍くな



写真1 稲わらが散布された圃場

表1 世界のメタン (CH<sub>4</sub>) 発生量

発生源		CH <sub>4</sub> (Tg/年)	全体の内訳 (%)	人為起源の内訳 (%)
自然湿地		149	20.3	—
農業・廃棄物		206	28.0	56.6
(内訳)	稲作	(30)	(4.1)	(8.2)
	反芻動物	(111)	(15.1)	(30.5)
	埋立・廃棄物	(65)	(8.8)	(17.9)
化石燃料		128	17.4	35.2
バイオマス燃焼		30	4.1	8.2
その他自然要因		222	30.2	—
合計		737 [584~881]	100.0	100.0

データは Saunois *et al.* (2020) より 各項目の和と合計の整数値は一致していない  
合計は平均値 [最小値~最大値] Tg (テラグラム: 1 g × 10<sup>12</sup>)

る。翌春、耕起とともにすき込まれた稲わらは、湛水されて酸素が少ない土壌中で分解することで、急激にメタンが発生する。

さらに、そのような圃場では、土壌の異常還元が発生し、水稻の生育が抑制される場合がある（写真2）。このような条件では、酢酸やフェノール酸類などの有機酸が発生し、水稻の根がダメージを受ける。その結果、葉が黄化し、生育が停滞する。そのため、積雪寒冷地水田におけるメタン発生量を削減することは、そのまま水稻の生育改善につながる可能性がある。



写真2 異常還元が発生した圃場  
(撮影：村山総合支庁農業技術普及課)

## 積雪寒冷地水田から発生するメタン削減技術の開発

そこで、積雪寒冷地水田におけるメタン発生量の削減と、併せて水稻の初期生育を改善する技術開発に取り組んだ。前述したように、メタンは酸素の少ない土壌中で、稲わらなどの有機物が分解されることで発生する。そのため、①水稻の栽培期間中に落水し土壌を酸化的にする②湛水状態で分解される稲わらを少なくする、ことで削減できると考えられる。そこで、稲わらが秋散布、春すき込みされる積雪寒冷地水田において、生産現場で取り組みやすい技術として、①中干し期間の延長②秋浅耕③石灰窒素の秋散布、を検証した。

## 中干し期間の延長技術

中干しは、生育中期に一定期間落水することで水稻の窒素吸収を抑え、その結果、過剰な分けつを抑え、水稻の根を健全に保つ働きがある。また、玄米粗タンパク質含有率を制御するためにも重要な技術である。さらに、中干しによって土壌が酸素に触れることから、メタン生成菌の活動が抑えられ、メタン発

生量が削減すると考えられる。

そこで、これらの効果をさらに高めるため、中干し期間を延長し、メタン発生量と、水稻「はえぬき」の生育、収量、品質へおよぼす影響を調査した。一般的に、当該地域における慣行の中干し期間は、6月下旬～7月上旬まで約7～10日落水することを基本とするが、さらに前に7日延長した場合（前延長）と、後ろに7日延長した場合（後ろ延長）を検証した。通常、水田からの1時間当たりメタン発生量は、移植後から中干しまで徐々に増加していき、中干し時には一時減少する。その後、中干し終了後から再び増加し、出穂期前後にピークが現れる。その後、落水してからは発生がほとんどみられなくなる。

図1をみると、中干しの前延長区または後ろ延長区では、慣行区に比べ中干し以降のメタン発生量が低く推移した。また、メタン発生量の削減効果は、中干しの後ろ延長区に比べ前延長区で高くなった。この理由として、試験を行った山形県では6月下旬に比べ7月中旬の降雨量が多く、前延長区のほうがより土壌が乾いたためと考えられた。

収量構成要素への影響をみると、中干し期間の延長によってm<sup>2</sup>当たりの籾数が減少し、収量もやや低下する傾向を示したが、玄米粗タンパク質含有率は慣行に比べ低下し、食味へよい影響があった（表2）。また、その効果は前延長区でより高いことがわかった。

このことから、慣行に比べ中干しを前または後ろに7日程度延長することでメタン発生量が削減され、収量はやや抑えられるものの食味によい影響があることが明らかとなった。

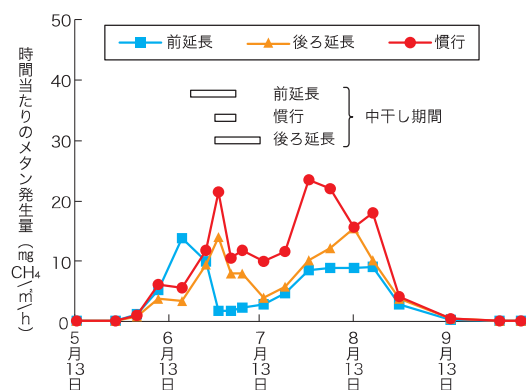


図1 メタン発生量の推移（中干し延長試験）

表2 水稻「はえぬき」の収量構成要素（中干し延長試験）

区	穂数		籾数			精玄米収量		玄米粗タンパク質含有率(乾物%)
	(本/m <sup>2</sup> )	慣行比	1穂(粒/本)	×100粒(/m <sup>2</sup> )	慣行比	(kg/10a)	慣行比	
前延長	492 a	100	62.7 a	308 a	87	592 a	90 a	6.7 a
後ろ延長	464 a	94	71.5 b	331 a	94	630 a	95 a	6.8 a
慣行	494 a	100	71.6 b	354 a	100	660 a	100 a	7.1 a

異なるアルファベット間には有意差あり (p < 0.05)、Tukeyの多重比較

## 秋浅耕技術

前述したように、秋に水稻を収穫してから翌春までに稲わらの分解を進めることができれば、栽培期間中の土壌の異常還元が抑えられ、メタン発生量が削減すると考えられた。そこで、秋耕起によるメタン削減技術と水稻の生育改善技術の開発に取り組んだ。試験は4ヵ年(2010~2013年)実施した。秋耕起は水稻収穫後の10月下旬に行い、表層に限定した秋浅耕区(5~8cm)と秋通常耕区(耕深18~20cm)を設けた。慣行区は秋耕起を行わず、すべての処理区で4月下旬に春耕起を行った。翌年、栽培期間中に発生するメタンの量を測定した(図2)。

その結果、メタン発生量は秋浅耕区が最も少なく、次いで秋通常耕区で、慣行区が最も多くなった。また、分けつ盛期、最高分けつ期における茎数は、秋浅耕区が最も多くなった(表3)。両秋耕区の収量は、慣行区に比べ同等からやや多く、玄米粗タンパク質含有率は、慣行区と同等だった。

このことから、秋耕によって秋から翌春までの稲わらの分解が進み、湛水期間中に嫌気条件下で分解する稲わらの量が減少したことからメタン発生量が削減されたと考えられた。同時に、有機酸などの生育阻害物質も減少したと考えられ、水稻の生育も改善し茎数が増加した。また、秋耕時の耕深の違いによる差については、通常の高さに比べ浅耕でメタン削減効果が高くなった。当該地域では冬期間に積雪があり、翌春は融雪した水が圃場にたまる。秋通常耕では、ぬかるんだ土壌に水分がより多く保持されて酸素が少なくなることが、秋浅耕に比べメ

タン削減効果が低い理由のひとつと考えられる。さらに、秋浅耕では、秋通常耕に比べ翌春の地耐力が高く、トラクターの作業性が良好だった。

これらのことから、積雪寒冷地で秋耕を行う場合の深さは、浅耕(5~8cm程度)がよいと考えられる。一方、冬から翌春の積雪量が東北地域に比べ少ない太平洋側や関東以西の地域では、秋通常耕と秋浅耕のメタン発生量に違いがみられないとの報告もあることから(Nakajima *et al.* 2017、田中ら・2019)、秋浅耕のメタン削減効果と水稻生育への影響は、地域や土壌条件によって異なる可能性があることに留意する必要がある。

## 石灰窒素の秋施用技術

前述したように、秋浅耕を行うことで翌年のメタン発生量が削減し、水稻の生育が改善されることがわかった。しかし、土壌水分が高い圃場では、秋浅耕が難しいこと、秋耕が行われる10月下旬は水稻の乾燥・調製作業で忙しいことから、より省力的な方法が求められる。そこで、秋耕を行わずに、収穫後、圃場に散布された稲わらの上から石灰窒素を施用し、稲わらの分解を促進させる技術開発に取り組んだ。石灰窒素は、稲わらを分解する際に必要となる窒素の添加と、土壌微生物の活動に適したpHにすることを目的として使用した。なお、本技術は前報の「石灰窒素だよりNo.148」(2013年)でも述べているので、そちらも参照いただければ幸いである。本稿では、前報に引き続いて検証した内容も併せて報告する。

石灰窒素を秋に20kg/10a施用した場合、翌年のメタン発生量は慣行区に比べ17~37%削減された(図3)。

また、前報では、石灰窒素の秋施用によって水稻「はえぬき」の生育量が増えたため、減肥を検証した。その結果、基肥の窒素成分を1kg/10a減肥しても、慣行区に比べ初期茎数が多く、葉色は濃かった(表4)。さらに幼穂形成期追肥の窒素成分を1kg/10a減肥すると、穂揃期の

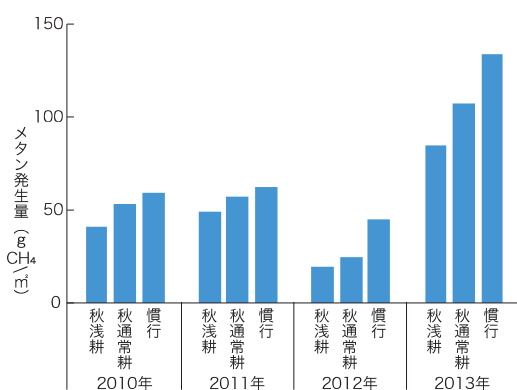


図2 メタン発生量(秋耕試験)

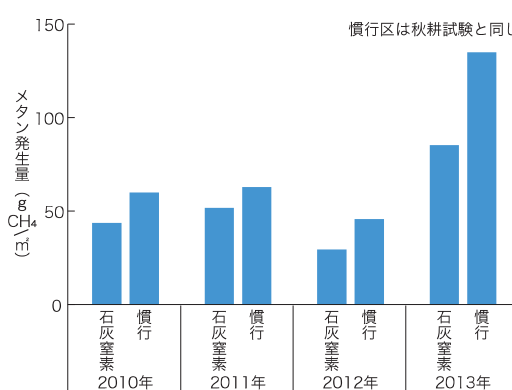


図3 メタン発生量(石灰窒素試験)

表3 水稻「はえぬき」の生育、収量(秋耕試験)

区	茎数または穂数(本/m <sup>2</sup> )			精玄米収量(kg/10a)	玄米粗タンパク質含有率(乾物%)
	6月20日(分けつ盛期)	7月10日(最高分けつ期)	9月10日(成熟期)		
秋浅耕	513 ± 66	585 ± 93	475 ± 48	661 ± 25	7.4 ± 0.16
秋通常耕	431 ± 22	527 ± 59	472 ± 48	650 ± 26	7.4 ± 0.17
慣行	408 ± 36	530 ± 105	457 ± 68	638 ± 11	7.4 ± 0.21

数字は4ヵ年の平均値±バラつき(標準偏差)



表4 水稲「はえぬき」の生育、収量（石灰窒素試験）

区	茎数または穂数（本/m <sup>2</sup> ）			葉色（SPAD）			精玄米収量（kg/10 a）	玄米粗タンパク質含有率（乾物%）
	6月10日（分げつ初期）	6月30日（最高分げつ期）	9月10日（成熟期）	6月10日（分げつ初期）	6月30日（最高分げつ期）	8月10日（穂前期）		
石灰窒素（5+1）	287	735	575	37.9	42.2	36.5	744	7.2
石灰窒素（5+0）			531			34.0		6.9
慣行（6+2）	229	551	528	34.7	37.3	36.3	640	6.6

試験区の（ ）内は基肥+幼穂期追肥の窒素量（kg/10 a）

葉色は慣行区よりも低下した。収量は慣行区と同等以上、玄米粗タンパク質含有率は乾物当たり7%程度であり、山形県の良食味米の目標値と同等だった。

「はえぬき」で技術開発を行った後、山形県の生産現場から、「つや姫」における石灰窒素の秋施用技術開発の要望があった。「つや姫」は、山形県が誇るブランド品種であり、食味を最も優先することから、玄米粗タンパク質含有率を基準値以下（乾物で7.5%以下）にする必要がある。なお、山形県内の「つや姫」栽培は、特別栽培または有機栽培で行うことと定められており、当初、化学合成の窒素を含む石灰窒素の使用は難しいとされていた。持続性の高い農業生産方式の導入に関する法律施行規則の省令案一部改正へのパブリックコメントに対する農林水産省回答（2013年10月）において「有機物の腐熟促進のみを目的として石灰窒素を施用する場合は化学肥料の使用量にカウントする必要がない」とされたことから、「つや姫」栽培における石灰窒素と基肥および穂肥の量について検証した。

その結果、石灰窒素の施用量を「はえぬき」の半量の10kg/10 aとし、基肥と穂肥を慣行区と同量とすることで、慣行区よりも初期茎数が増加し、慣行と同等以上の

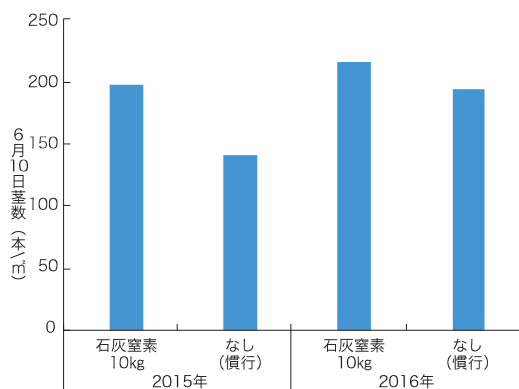


図4 「つや姫」の初期茎数（石灰窒素試験）

表5 水稲「つや姫」の生育、収量（石灰窒素試験）

年次	試験区	精玄米重（kg/10 a）		m <sup>2</sup> 粒数（×100粒）		玄米粗タンパク質含有率（乾物%）
		慣行比	慣行比	慣行比	慣行比	
2015年	石10：基3+追1.5	525	98	318	102	5.7
	石10：基4+追0	534	100	332	106	5.7
	（慣行）石0：基4+追1.5	534	100	312	100	5.7
2016年	石10：基4+追1.5	675	108	362	111	6.5
	石10：基4+追0	570	91	312	96	6.5
	（慣行）石0：基4+追1.5	627	100	326	100	6.2

石：石灰窒素、基：基肥、追：穂肥（幼穂形成期追肥）

石10は10kg/10 a施用、石0は石灰窒素無施用、基肥と追肥の数字は10 a当たり窒素成分量

収量を確保することができた（図4、表5）。石灰窒素施用区の玄米粗タンパク質含有率は、慣行区と同等～

わずかに上昇したが、いずれも基準値以下であった。また、試験圃場の可給態窒素は15mg/100 gと、地力は中程度だった。しかし、前述したとおり、「つや姫」は食味を最優先とすることから、石灰窒素の施用は、異常還元が毎年起きる圃場や、地力が低く低収の圃場でのみ行うべきである。

生産現場でも、玄米の粗タンパク質含有率が毎年高い圃場、地力が高い圃場、生育コントロールが難しい全量基肥（一発肥料）栽培では、石灰窒素の秋施用を行わないよう指導している。なお、石灰窒素の施用量を20kg/10 aから10kg/10 aとした場合でも、無処理に比べ稲わらの分解率は高くなり、翌年のメタン発生量も少なくなることがわかっている。より詳細なデータを得るため、現在、試験を実施している。



水田から発生する温室効果ガス（メタン）の発生量を削減し、特に積雪寒冷地において水稲の生育を改善する技術をいくつか述べた。導入にあたっては、それぞれの技術の導入しやすさ、コスト、効果を十分検討したうえで実施していただきたい。

●引用文献

- Hayano, M., Fumoto, T., Yagi, K., and Shirato, Y. 2013. National-scale estimation of methane emission from paddy fields in Japan: Database construction and upscaling using a process-based biogeochemistry model. *Soil Sci. Plant Nutr.*, 59, 812-823.
- Nakajima, M., Cheng, W., Hanayama, S., and Okada, M. 2017. Shallow autumn tillage does not reduce CH<sub>4</sub> emission from an Andisol paddy field in Morioka, a cold region in Japan. *Journal of Agricultural Meteorology*, 73, 92-99.
- Saunio *et al.* 2020. The Global Methane Budget 2000-2017. *Earth Syst. Sci. Data*, 12, 1561-1623.
- 田中雄一・菅野淳夫・尾賀俊哉・鈴木玉与・井手康人・林元樹, 2019. 水田における秋冬季の浅耕が稲わら分解と灌漑期のメタン排出量に及ぼす影響. *土肥誌*, 90, 372-380.