

## 科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 25 年 5 月 10 日現在

機関番号：11301

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2010～2012

課題番号：22580065

研究課題名（和文）新規浄水発生土の資源化と鉄・ケイ素供給による環境保全型水稻生産の安定化技術の構築

研究課題名（英文）Development of environment-friendly sustainable rice farming with reuse of new purification plant sludge, and application of iron or silicon

研究代表者

伊藤 豊彰（ITO TOYOAKI）

東北大学・大学院農学研究科・准教授

研究者番号：10176349

研究成果の概要（和文）：有機栽培体系において、未利用廃棄物であるポリシリカ鉄浄水発生土と他のケイ酸資材は、水稻の収量、外観品質を向上させ、斑点米被害を低下させ、ケイ酸施用は根の量と活性を増加させた。さらに、ポリシリカ鉄浄水発生土は酸化鉄供給によって、水田からのメタン放出量を低下させる可能性を示めた。これらの結果より、PSI 浄水発生土およびケイ酸資材の施用が環境保全型水稻生産体系の重要な要素技術になりうると結論した。

研究成果の概要（英文）：Application of poly-silicate iron (PSI) sludge derived from water purification plants, unused waste, improved rice yields and brown rice quality, and decreased pecky rice damage caused by rice-feeding bugs in the organic rice farming system. PSI sludge and silicate application were effective in increasing rice root elongation and activity. PSI sludge showed the potential of decreasing methane emission in the organic-applied paddy soils. Application of PSI sludge and silicate fertilizer can contribute to establish the technology of environment-friendly paddy agriculture.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2010 年度	2,900,000	870,000	3,770,000
2011 年度	500,000	150,000	650,000
2012 年度	500,000	150,000	650,000
年度			
年度			
総計	3,900,000	1,170,000	5,070,000

研究分野：農学

科研費の分科・細目：土壌肥料・植物栄養学

キーワード：環境保全型水稻生産、ポリシリカ鉄浄水発生土、ケイ酸、酸化鉄、玄米品質、根活性、メタン

## 1. 研究開始当初の背景

近年わが国では、農薬・化学肥料を削減あるいは全く使用しない環境保全型農業（減農薬・減化学肥料栽培や有機栽培）が急速に展開しつつある。この栽培体系では、水稻生育に最も大きく影響する窒素源として堆肥や

有機質肥料などの有機物が使用される。有機物による窒素供給は分解を経て緩やかに起こるために、特に生育初期の窒素供給は、化学肥料を使用した場合（慣行栽培）に比べて低い。さらに、湛水条件下での有機物施用は有機酸の生成や還元環境で硫酸イオンから

生成される硫化水素によって、水稻根の養分吸収や伸長が阻害される可能性がある。これらの2つの要因が慣行栽培体系に比べて環境保全型水稻生産体系で茎数(穂数)が少なく、収量性が低い主要な土壌肥料的な原因と考えられる。PSI(ポリシリカ鉄)は近年我が国で開発された新規の凝集剤であり、従来のポリ塩化アルミニウム凝集剤を用いた浄水発生土はAlによるリン酸固定など、農業利用しにくい難点をもつ。これに対して、PSI浄水発生土はケイ酸資材としてのみならず、酸化鉄供給による還元環境下でのメタン生成抑制や根生育の改善に有効な資材として資源化が可能と考えられる。浄水場発生土の農業分野での資源化は、廃棄コスト削減、未利用廃棄物の有効活用という観点から、重要である。低窒素供給による生育制限に対する対策技術として、慣行栽培体系で確立されてきた、ケイ酸施用による窒素生産効率の向上技術(宮森:土肥誌,1996)の適用が考えられる。ケイ酸施用は水稻の病害虫抑制に効果的である(竹内:北日本病害虫研報,1997)ことから、農薬使用を削減する環境保全型水稻生産体系においてケイ酸による水稻の生産安定化技術を構築することは大きな意義がある。

## 2. 研究の目的

本研究では、新規の浄水場廃棄物であるポリシリカ鉄凝集剤による浄水発生土(PSI浄水発生土)の施用が環境保全型水稻生産における収量・品質の安定的向上、環境保全効果の増強に有効であるかを明らかにする。そのために、PSI浄水発生土の施用が、(1)有機栽培体系における収量・外観品質の向上、(2)湛水、有機物施用条件での根環境の改善、(3)有機物施用下の水田におけるメタン放出量抑制、に有効であるかを明らかにした。

## 3. 研究の方法

(1)有機栽培体系におけるPSI浄水発生土およびケイ酸資材の水稻収量、品質に対する効果

東北大学大学院農学研究科附属複合生態フィールド教育研究センター(宮城県大崎市)の黒ボク土水田圃場(36m×8m、3圃場=3反復)に30m<sup>2</sup>の4処理区(資材無施用区、PSI発生土施用区、鉍さい質ケイ酸肥料施用区、シリカゲル施用区)を設定し、2010~2012年(3年間)、水稻(品種ひとめぼれ)の栽培試験を行った。資材は同所と同じ資材を毎年施用した。鉍さい質ケイ酸肥料(ケイカル)は、標準施用量(200g/m<sup>2</sup>)とし、可溶性ケイ酸(0.5M塩酸可溶ケイ酸)がこれと同量となるように、PSI浄水発生土(毎年、乾物重で633~912g/m<sup>2</sup>)とシリカゲル(可溶性ケイ酸90%として、毎年61~78g/m<sup>2</sup>)を施用した。栽培

管理は有機栽培(農薬・化学肥料不使用)体系で行い、有機質肥料(2010年:有機アグレット、2011-2012年:スズカ有機)は全窒素で7g/m<sup>2</sup>(基肥5+追肥2)とし、リン酸とカリは3.5~7g/m<sup>2</sup>であった。水稻の生育調査、収量調査、玄米の外観品質調査、養分濃度測定を行った。供試したPSI浄水発生土の性質を表1に示した。

表1 供試したPSI浄水発生土の性質

	g/kg			
	可溶性ケイ酸	全窒素	全炭素	遊離酸化鉄
2010年、2011年	108	4.92	42	175
2012年	77	4.05	31	385

(2)PSI浄水発生土、ケイ酸肥料の水稻根系に及ぼす影響

①2011年に枠栽培試験をおこない、水稻の生育・収量および根の現存量・発生量について調査をおこなった。上述の(1)の圃場の隣接水田に28cm四方の枠を設置して、その枠内に水稻(ひとめぼれ)2株を移植した。処理としては有機質肥料を7gN/m<sup>2</sup>となるように施用した「有機質肥料区」とPSI浄水発生土を1.5kg/m<sup>2</sup>施用した「有機質肥料+PSI施用区」を設けた。水稻の生育と最高分けつ期の根系の現存量と根の発生量を調査した。

②水稻根系に対するケイ酸の効果を水耕栽培で検証した。「対照区」、「ケイ酸施用区」とともに肥料として市販の液肥肥料を十分量(1LあたりN:120mg、水溶性P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>:200mg、水溶性K<sub>2</sub>O:100mg)を施用し、ケイ酸施用区には2mM/Lとなるようにケイ酸カルシウムで施用した。水耕液は3日に一度交換した。播種後57日のイネ(ひとめぼれ)のポット苗を用いて、24日間栽培した後に、地上部乾物重、出液速度、根乾物重、S/R比(地上部/地下部比)、全根長、細根長(直径0.2mm以下の根系)、TTC(トリフェニルテトラゾリウムクロライド)活性(根の酸化力で根の活力の指標、根長のうち発色した部分の割合)を測定した。

③上述の(1)の2012年度の圃場栽培試験の各処理区それぞれから最高分けつ期に地下部を採取して根重、全根長および直径別の根長を測定し、比根長および根の分岐度合(細根長を節根長で割ったもの)を算出した。

(3)有機施用水田におけるメタン放出量に対するPSI浄水発生土の抑制効果

表2 供試土壌の有機物含量と酸化鉄含量

土壌	採取地	土壌分類	g/kg	
			全炭素	遊離酸化鉄
鶴岡	山形県鶴岡市	灰色低地土	25.5	3.7
古川1	宮城県大崎市古川新田	灰色低地土	16.7	8.4
古川2	宮城県大崎市古川大幡	グライ低地土	28.1	21.3

上述の(1)の圃場の隣接水田に28cm四方の枠を設置して、その作土15cmを酸化鉄

含量の異なる3つの沖積土壌(表2)で交換し、水稻(ひとめぼれ)2株を移植して、栽培試験を2012年に行った。慣行量の農薬と化学肥料(N-P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>-K<sub>2</sub>O=7-7-7 g/m<sup>2</sup>)を使用した。環境保全型農業の基本となる堆肥(牛ふん堆肥、乾物で500g/m<sup>2</sup>)を施用した。

処理は、3土壌にPSI浄水発生土(表1の2010、2011年に使用した発生土と同様)を乾物重で0、2、4 kg/m<sup>2</sup>、作土全層に混和し、3反復分を乱塊法で配置した。PSI浄水発生土は2012年に施用した処理区(施用1年目)と前年に施用して栽培を行った土壌を次年度そのまま使用した処理区(施用2年目)を設定し、作土(5cm深さ)の酸化還元電位(Eh)とメタンフラックス(2週間ごと)の測定を行った。

#### 4. 研究成果

(1)有機栽培体系におけるPSI浄水発生土、ケイ酸資材の水稻収量、品質に対する効果

表3 玄米収量および収量構成要素

処理区	2010年			
	玄米収量 kg/m <sup>2</sup>	総粒数 ×10 <sup>6</sup> 粒/m <sup>2</sup>	登熟歩合 %	千粒重 g/粒
対照区	394	23.2	80.7	22.8
ケイカル区	(108)	(100)	(107)	(100)
シリカゲル区	(104)	(101)	(108)	(100)
PSI区	(108)	(100)	(108)	(102)
2011年				
対照区	526	26.4	88.5	22.5
ケイカル区	(102)	(102)	(101)	(100)
シリカゲル区	(101)	(102)	(101)	(99)
PSI区	(103)	(103)	(101)	(100)
2012年				
対照区	546	27.7	89.6	22.0
ケイカル区	(103)	(99)	(102)	(101)
シリカゲル区	(107)	(104)	(103)	(101)
PSI区	(104)	(101)	(101)	(101)

\*異なる文字は多重比較(Tukey法、5%水準)で有意差があることを表す。表3、4の( )

表4 成熟期水稻の茎葉、籾のケイ酸濃度(%)

処理	2010年			
	茎葉		籾	
対照区	9.9	(100) b	3.3	(100) a
ケイカル区	10.9	(110) ab	3.6	(108) a
シリカゲル区	11.8	(119) a	3.4	(103) a
PSI区	10.4	(105) b	3.4	(104) a
2011年				
対照区	9.6	(100) b	2.58	(100) b
ケイカル区	10.5	(109) b	2.72	(105) ab
シリカゲル区	13.5	(141) a	3.02	(117) ab
PSI区	10.5	(109) b	2.61	(101) b
2012年				
対照区	9.5	(100) b	3.1	(100) b
ケイカル区	10.4	(109) b	3.4	(108) ab
シリカゲル区	12.8	(135) a	3.6	(115) a
PSI区	13.1	(138) a	3.7	(119) a

内の数値は、無施用区に対する割合(%)を表す。

##### ① 収量とケイ酸濃度

玄米収量は3カ年とも、資材無施用区に対して、PSI浄水発生土区、2つのケイ酸資材

施用区で増加する傾向を示した(5%水準での有意差はなし、表3)。3カ年とも、3つの資材施用区において総粒数が無施用区と同等以上であるにも関わらず登熟歩合が増加し(整粒歩合も増加する傾向を示した。データ省略)、特に登熟期間が高温で推移した2010年は、ケイ酸資材施用によって登熟歩合が3カ年のうち最も大きく向上した。これは、稲体ケイ酸濃度が増加したことが原因と考えられる。事実、成熟期の茎葉と籾のケイ酸濃度は、PSI浄水発生土区と2つのケイ酸資材施用区で有意に増加した(表4)。

以上の結果は、ケイ酸吸収を増加させることによって、登熟歩合と整粒歩合の増加を通じて有機栽培水稻の玄米収量を高めることができることを示唆する。登熟期間が高温の場合に、この効果が顕著に作用したことから、PSI浄水発生土を含むケイ酸資材は有機栽培水稻の収量安定化に寄与すると考えられた。

##### ② 玄米の外観品質と斑点米発生

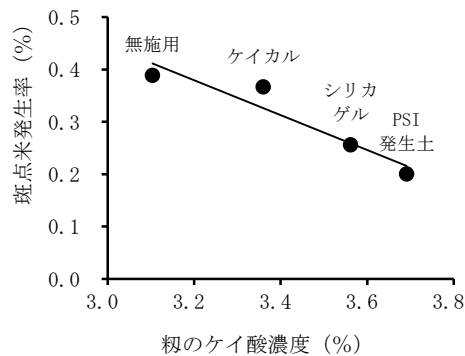


図1 籾ケイ酸濃度と斑点米率

出穂後20日間の平均気温が24-26℃以上では高温障害による玄米の白未熟粒割合が増加する(近藤、2005)。2010年は、このような条件であったが、ケイ酸資材施用区で白未熟粒割合が無施用区の67-87%に低下した。さらに、アカスジカスミカメなどの吸汁によって発生する斑点米は籾のケイ酸濃度と負の関係を示し、斑点米発生が最も多かった2012年では10%水準で有意な関係(R<sup>2</sup>=0.93)を示した(図1)。

PSI浄水発生土は、土壌溶液中のケイ酸濃度を高めたこと(図2)ことから、ケイ酸供給能をもつことが明らかである。

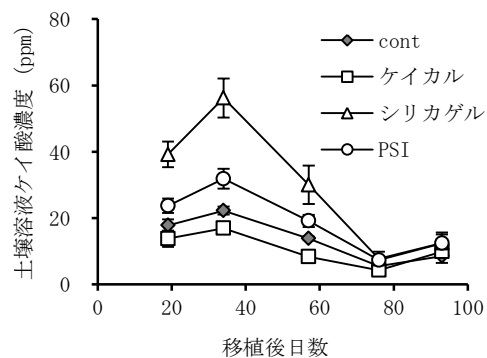


図2 土壌溶液ケイ酸濃度の推移

ケイ酸濃度が増加すると、稲体の水利用効率が高まり、光合成能の増加を通じて登熟歩合が高まること（宮森、1996）、玄米窒素濃度の低下により食味が向上すること（内村ら、2000）、登熟期間の高温ストレス耐性が高まり、白未熟粒発生が抑制されること（金田ら、2010）、斑点米率が低下すること（安田・永田、2005）が報告されている。

これらの水稻に対するケイ酸資材の効果は慣行栽培体系で得られた結果である。本研究の結果から、ケイ酸資材の施用が有機栽培体系においても水稻の玄米収量と品質の向上、高温耐性強化に有効であり、特に有機栽培で求められる害虫被害軽減に有効であることが明らかとなった。さらに、PSI 浄水発生土は、既存のケイ酸資材（鉱さい質ケイ酸肥料、ケイカル）と同等以上にケイ酸供給能をもつことが明らかとなった。

(2) PSI 浄水発生土、ケイ酸肥料の水稻根系に及ぼす影響

① 2011 年枠試験における根の現存量と発生量の調査では、有機質施用に PSI 浄水発生土を加えた場合、最高分げつ期前後の根の発生量が増加した。

表5 枠栽培試験における新根発生量

移植後日数	処理	面積あたり (g/m <sup>2</sup> day)	茎あたり (mg/tiller day)
48-63	有機+PSI	38.6 *	69.5 *
	有機	30.7	50.4
63-78	有機+PSI	40.5	67.8
	有機	39.0	65.2

\*は5%水準で有意な差異があることを示す。

② 水耕栽培でイネ根系へのケイ酸施用効果を調査した結果、地上部乾物重、全根長のどちらも10%水準で有意な効果が認められた。S/R比および全根長に占めるTTC発色には5%水準で差異が認められ、細根長はケイ酸施用区では1%水準で有意に大きかった。これらから、ケイ酸を施用すると細根長が増加し、根の活力があがる可能性が示唆され、それが水稻の生育にも影響する可能性も考えられた。

表6 水耕栽培における水稻根系

処理	地上部乾物重(mg)	根乾物重(mg)	S/R比	全根長(cm)	細根長(cm)	TTC発色割合(%)
コントロール	226.5	33.4	6.9	1348	625	45.4
ケイ酸添加	255.7	33.0	7.9	1479	740	55.6
	†	ns	*	†	**	*

†、\*、\*\*はそれぞれ10、5、1%水準で有意な差異があることを示す。Nsは有意差なし。

③ 圃場におけるケイ酸肥料の添加が水稻

根系に与える影響については、全根長に有意な差異は認められなかったが、細根長にはケイ酸施用の効果が認められた。また細根の多寡と関係する比根長および根の分岐の程度にも有意な効果が認められた。

さらに、細根の伸長促進効果は、シリカゲル施用区でみられ、PSI 浄水発生土施用区ではみられなかったことから、本実験条件ではPSI 浄水発生土の酸化鉄による根の生育環境改善効果は確認できなかった。

表7 最高分げつ期における水稻根系

処理	根長密度 (cm/cm <sup>3</sup> )	直径別根長	比根長 (m/g)	根の分岐程度 (細根長/節根長)
		<0.1 (cm/cm <sup>3</sup> )		
コントロール	56.9	31.0	289	3.16
シリカ	63.6	36.4	307	3.61
ケイ酸	53.6	28.9	276	3.13
PSI	51.1	27.0	270	3.06
LSD <sub>0.05</sub>		7.78*	36.1†	0.294**

†、\*、\*\*はそれぞれ10、5、1%水準で有意な差異があることを示す。

以上の結果より、有機栽培においてケイ酸施用により、水稻根系が拡大される可能性が示唆され、特に細根が大きくなると考えられた。その効果はPSI 浄水発生土の施用によっても期待されると考えられる。

(3) 有機施用水田におけるメタン放出量に対するPSI 浄水発生土の抑制効果

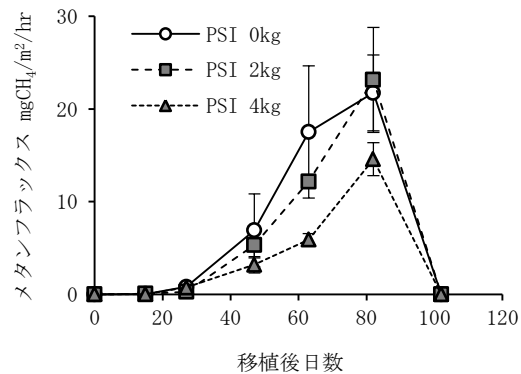


図3 メタンフラックスの推移 (古川1、施用2年目)

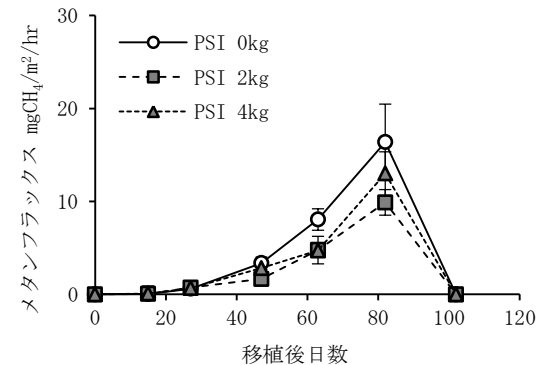


図4 メタンフラックスの推移 (古川2、施用2年目)

メタンフラックスは、PSI 浄水発生土の施用によって施用1年目区では減少せず、酸化鉄含量の少ない鶴岡土壌では増加する傾向を示した(データ省略)。施用2年目区では、PSI 浄水発生土の施用によって、鶴岡土壌では変化がなかったが、酸化鉄含量の多い古川1土壌(図3)、古川2土壌(図4)で減少する傾向を示した。栽培期間中の総メタン放出量(図5)は、施用2年目の古川1、2土壌でPSI 浄水発生土の施用によって低下した(5%水準で有意差はなし)。

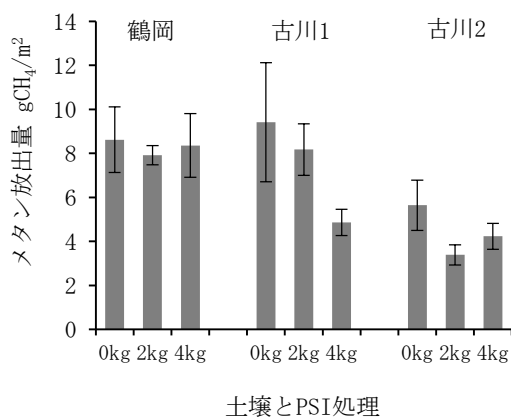


図5 メタン放出量(施用2年目)

古川1、2土壌においては、栽培期間中の作土の酸化還元電位がPSI 浄水発生土の施用によって高い値を示した(図6、施用2年目の古川2土壌のみ示した)。このことは、PSI 浄水発生土によって、作土が相対的に酸化的に維持されたことを表わす。

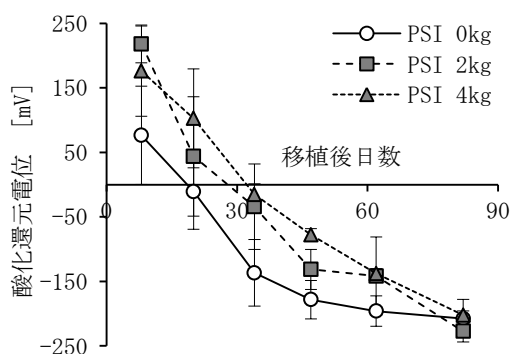


図6 酸化還元電位の推移(古川2, 施用2年目)

土壌中の酸化鉄が電子受容体となる反応(酸化鉄の還元)は、メタン生成菌によるメタン生成反応よりも先に生じるため、土壌還元進行に抑制的に作用するとされている(八木, 2004)。PSI 浄水発生土の施用によって電子を受容できる(容易に還元される)酸化鉄が増加し、その還元反応に多くの電子が受容(消費)されたために、作土は相対的に

酸化的に推移し、メタン放出量が減少する傾向を示したと考えられる。

○PSI 浄水発生土のメタン放出抑制効果が発揮される条件

以上の結果より、PSI 浄水発生土のメタン放出におよぼす効果は、施用後年数と土壌によって異なることが明らかとなった。このことの原因とPSI 浄水発生土のメタン放出抑制効果が発揮される条件を考察した。

Jäkel et al. (2005) は、合成した酸化鉄(フェリハイドライト)を添加して土壌の易還元性鉄が2.5 g/kgから5.0 g/kgに増加した場合に、水田からのメタン放出が抑制されたことを報告している。PSI 浄水発生土の4kg/m<sup>2</sup>の施用は、(作土15cm、仮比重0.8とした場合、1m<sup>2</sup>の作土の土壌重量は120kg)、土壌の酸化鉄含量(Fe)を5.8 g/kg増加させたはずである。少なくとも、この遊離酸化鉄の50%は還元されると考えられるので、いずれの土壌においてもPSI 浄水発生土4kg/m<sup>2</sup>の施用によってメタン放出が抑制される易還元性酸化鉄が供給されたはずである。

しかしながら、PSI 浄水発生土施用1年目では、いずれの土壌ともメタン放出量は低下せず、鶴岡土壌では増加傾向を示した。施用2年目では、鶴岡土壌ではメタン放出量が低下しなかった。これは、PSI 浄水発生土が易還元性酸化鉄とともに、有機物(全炭素含量で42 g/kg)を含むために、発生土の施用は還元抑制(酸化鉄)と還元促進(有機物)の両面をもつためである。そのために、施用1年目は施用された有機物の分解と酸化鉄の還元が拮抗し、メタン放出量は低下しなかったと考えられる。施用2年目においては、PSI 浄水発生土の易分解性有機物の多くが分解したために、酸化鉄含量の高い古川1、2土壌では、土壌の酸化鉄とPSI由来の酸化鉄による電子受容が土壌有機物分解による電子供給を一時的には勝ったために、メタン放出量が減少したと考えられる。鶴岡土壌のように、酸化鉄含量の少ない土壌に対しては、さらに多くの酸化鉄添加がメタン放出量を抑制するためには必要と考えられる。

以上の結果より、遊離酸化鉄が8.4 g/kg以上の土壌においては、PSI 浄水発生土の施用(遊離酸化鉄=175 g/kgの場合は、4kg/m<sup>2</sup>以上)によって、施用2年目以降はメタン放出量が抑制されることが期待できる。今回用いたPSI 浄水発生土の鉄含量は高くなく、表2にあるように酸化鉄含量がさらに高いPSI 浄水発生土(385g/kg)も存在する。このようなPSI 浄水発生土を用いることによって、メタン放出抑制効果を高めることが可能と考えられる。

○本研究の結論

環境保全効果の高い有機栽培体系において、未利用廃棄物で、酸化鉄とケイ酸を含むポリシリカ鉄浄水発生土、および既存のケイ酸資材は、水稻の収量を増加させ、高温登熟による白色未熟粒の発生を抑制して外観品質を向上させ、カメムシ吸汁による斑点米被害を低下させる可能性が示唆された。これらは、稲体のケイ酸濃度上昇による効果と考えられ、さらに本研究の結果より、ケイ酸施用によって、水稻根の量と活性が増加することからも水稻の生産安定性が向上すると考えられた。さらに、ポリシリカ鉄浄水発生土に含まれる易還元性酸化鉄の還元抑制効果によって、酸化鉄含量が中位以上の水田を低メタン型の土壌に改良できると考えられた。

以上の結果を総合して、PSI 浄水発生土およびケイ酸資材の施用は、環境保全型水稻生産体系の重要な要素技術になりうると結論した。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[学会発表] (計 6 件)

- ① 對馬啓太、加茂弘大、秋田和則、宇野亨、田島亮介、齋藤雅典、伊藤豊彰 (2012) 水稻の有機栽培におけるポリシリカ鉄浄水発生土等のケイ酸資材の効果. 日本土壤肥料学会 2012 年度学会、鳥取大学 (2012 年 9 月 4 日)
- ② 加茂弘大、對馬啓太、秋田和則、宇野亨、田島亮介、齋藤雅典、伊藤豊彰 (2012) ケイ酸供給能の異なる土壌におけるポリシリカ鉄浄水発生土の水稻生育への影響. 日本土壤肥料学会 2012 年度学会、鳥取大学 (2012 年 9 月 4 日)
- ③ 佐藤洋介、堀川拓未、伊藤豊彰 (2012) 家畜ふん堆肥施用条件でのポリシリカ鉄浄水発生土の水稻生育およびメタン放出に及ぼす影響. 日本土壤肥料学会 2012 年度東北支部大会、青森県観光物産会館 (2012 年 7 月 4 日)
- ④ Tajima, R., K. Kamo, K. Tsushima, A. Mashiko, T. Ito and S. Saito (2012) The Dynamics of Paddy Rice Roots in Organic Farming. ISRR2012, Dundee (2012 年 6 月 25 日~30 日)
- ⑤ Tajima, R., K. Tsushima, K. Kamo, T. Ito and M. Saito (2011) Effect of PolySilicate-Iron sludge on rice roots at organic farming. The JSRR's 20th Anniversary Symposium, Tokyo University (2011 年 11 月 6 日)

- ⑥ 増子晶彦、田島亮介、伊藤豊彰、齋藤雅典 (2010) 有機質肥料が水稻の生育・収量および根系の発生・枯死に及ぼす影響. 日本土壤肥料学会 2010 年度大会、北海道大学 (2010 年 9 月 7 日)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

伊藤 豊彰 (ITO TOYOAKI)  
東北大学・大学院農学研究科・准教授  
研究者番号：10176349

(2) 研究分担者

田島 亮介 (TAJIMA RYOSUKE)  
東北大学・大学院農学研究科・助教  
研究者番号：60530144