

水稻の硫黄欠乏症の発生及び硫黄吸収に 及ぼす諸要因の検討

大家 理哉・水田有亮

Study of factors affecting the occurrence of sulfur deficiency and sulfur absorption in rice plants

Masaya Ooya and Yusuke Mizuta

緒言

硫黄は植物における必須元素の一つであるが、水稻作では灌がい水や降雨から供給される以外に、肥料の副成分として投入されるため、積極的に硫黄を施用する必要はないとされてきた。硫黄は土壤中で、非湛水期間には硫酸イオンの形態で存在するものの、湛水期間には還元作用を受けて硫化物イオンとなり、鉄などの金属元素と結合して難溶態となる。しかし、鉄が少ない場合には硫化水素が形成されて水稻の根を傷めるため、生育不良や減収を招く「秋落ち現象」を引き起こすことが過去に問題となった(浅見, 1992)。このことから、リン酸アンモニウムや尿素など副成分に硫黄を含まない肥料への転換が図られてきた(水野・水野, 2019)。

一方、高温多雨の気象条件下にある東南アジア等では、水稻で硫黄欠乏症の発生が報告されており、国内でも近年になって、硫黄欠乏症の発生に関する報告(辻, 2000a,b,c; 小野寺ら, 2011; 長谷川ら, 2015; 棚橋ら, 2016; 広島県, 2025)が増えている。菅野(2019)は土壌や灌がい水に由来する硫黄供給量の低下が主な発生要因であるとともに、土壤中鉄以外の可溶性金属元素(亜鉛, 鉛, カドミウム, 銅)の存在下において、鉄よりも難溶性の金属硫化物の形成が硫黄供給能に大きく影響することを指摘している。いずれにしても、硫黄欠乏症が発生する水田では、対症療法として不足する硫黄の施用が必要であり、石膏など硫黄を

有する資材の施用が有効とされている(小野寺, 2011, 大家・水田, 2022)。施用された硫黄や、土壌及び灌がい水で供給される硫黄の多くは硫酸イオンの形態で水稻に吸収される(菅野, 2019)。しかし、前述したとおり、硫酸態の硫黄は通常の移植栽培では還元されて硫化物イオンとなり、金属元素と結合して難溶態となる。このように、硫黄の可給性に大きく影響する土壌の還元は湛水が大きな要因であるが(大家ら, 2017; 菅野, 2019)、易分解性の有機物の存在も湛水による還元を促す要因の一つである。水稻作ではコンバインが普及し、稲わらは圃場にすき込まれることが大半である。しかし、すき込み時期は様々であり、春にすき込んだ場合には土壌の還元化を促すため、そもそも土壌に含まれる、もしくは施肥された硫黄の可給性に影響することが考えられる。

上記したように、水稻による硫黄吸収には土壌中における硫黄量だけでなく、土壌の酸化還元程度、灌がい水中の硫黄濃度など様々な要因が関与すると考えられる。これら各要因の寄与率や要因間の関係性を明らかにすることは、硫黄に係る合理的な肥培管理方法を確立する上で重要と考えられるが、このことについて検討した研究事例は見当たらない。そこで、硫黄欠乏症状が発生した現地の水田土壌を供して、水稻のポット栽培試験を2か年実施し、試験年次間で灌がい水に使用した水の違い、硫黄資材及び稲わら施用の有無が水稻の生育や、硫黄欠乏症発生の有無及び水稻茎葉中の硫黄含有率に及ぼす影響を調査し、各要因の寄与率及

本研究は、全農肥料委託試験「硫黄資材施用圃場における診断手法の適用と肥培管理技術の確立」(2020～2021年度)において実施したものの一部である

2025年12月12日受理

び要因間の関係性を明らかにしたので報告する。

材料及び方法

試験は岡山県農林水産総合センター農業研究所（赤磐市）の網室内で、2020年6月から同年10月にかけて試験1を、2021年6月から同年10月にかけて試験2を実施した。

1. 試験1（2020年）

硫黄欠乏症状が発生した現地の水田土壌を供したポット試験で、硫黄資材及び稲わら施用の有無が、水稻の生育や硫黄欠乏症発生の有無及び水稻茎葉中の硫黄含有率に及ぼす影響を調査し、各要因の寄与率及び要因間の関係性について検討した。

(1) ポット試験

過去に水稻栽培時に硫黄欠乏症状が発生した赤磐市内の現地圃場の水田作土を5月14日に採取し、ワグネルポット（0.02 m²、以下、ポットとする）に乾土換算で2.4 kgを充てんした。試験区として硫黄資材（以下、区の注釈ではSとする）の施用の有無と稲わら（以下、区の注釈ではわらとする）の施用の有無を組み合わせ、表1のとおり、Ⅰ区（S有/わら有）、Ⅱ区（S有/わら無）、Ⅲ区（S無/わら有）、Ⅳ区（S無/わら無）を設けた。1区1ポット、12反復で試験を開始した。ポットは約70 m²の網室内の日当たりが良い約8m²（縦4m、横2m）の範囲に、各区12ポットを縦方向に並べ、横方向に各区が等間隔になるように配置した。硫黄資材は「畑のカルシウム（片倉コープアグリ社製、硫黄含量17%）」を供試し、施用量はポット当たり1.2g（10a当たり60kg相当）とした。また、稲わら施用量はポット当たり8g（10a当たり400kg相当）とした。通常の肥料はセラコートRLL（セントラル株式会社製、窒素15-リン酸15-カリウム15%）を供し、施用量はポット当たり3.33g（10a当たり窒素25kg相当）とした。硫黄資材及び稲わら、肥料は6月17日に施用して、水道水で湛水後に代かきを行った。通常、稲わらのすき込み時期は水稻収穫後の秋季から

春季にかけて行われるが、本試験では土壌の還元に伴う硫黄欠乏症の再現を目的として、施用時期は入水直前とした。6月19日に水稻‘きぬむすめ’の稚苗（2本苗）を移植した。栽培期間中、蒸発散に伴い減少した水量を水道水で補給して、常に湛水状態を維持した。なお、2020年9月に測定した水道水中の硫黄濃度は4.3mg L⁻¹であった。

生育調査は7月15日、7月28日、8月25日に草丈、茎数、葉色を測定した。収穫期に当たる10月2日には稈長、穂長、穂数を測定した。また、上記の生育調査後に各区ポットの端から3ポットを供し、地上部を地際から刈り取り、70℃で通風乾燥後に乾燥重を測定し、粉碎して分析に供した。このため、生育調査の反復数は7月15日時点では12、7月28日時点では9、8月25日時点では6、10月2日時点では3となった。

(2) 土壌及び植物体の分析方法

ポット試験に用いた前地土壌の可給態硫黄含量を調べるため、採取した土壌を風乾して篩別後（目合い2mm）に分析に供した。風乾土と8.1 mMリン酸カルシウム抽出液の比を1：5とし、30分振とうして得られたる液中の硫黄濃度をICP発光分析法（ICPE-9000、株式会社島津製）により182.037 nmの波長で測定し、可給態硫黄含量は、風乾土中の含水率をもとに、乾土当たり重量で示した。次に、硫黄の可給性に大きく影響する硫黄と重金属元素との物質質量比を評価するため、現地の跡地土壌を供試し、上記と同様の方法で測定した可給態硫黄の物質質量と、重金属は菅野（2019）に準じて銅、亜鉛、カドミウム、鉛の物質質量を次の方法により測定した。すなわち、風乾土と0.1M塩酸抽出液の比を1：5とし、30分振とうして得られたる液中の各元素濃度をICP発光分析法で測定し、風乾土中の含水率をもとに算出した各元素の乾土当たり物質質量の合計をモル数で示した。

水稻茎葉中の養分含有率は次の方法により測定した。窒素は燃焼法（改良デュマ法）によりSUMIGRAPH（NC-220F、株式会社住化分析センター製）で測定した。硫黄は、グラフィイトブロック酸分解システム（株式会社アクタック製）を用いた湿式分解を行い、分解液中の硫黄濃度をICP発光分析法で測定した。湿式分解は以下の方法で行った。試料0.2gを分解容器に計りとり、濃硝酸16mlと過酸化水素2mlを添加後に室温で数時間放置し、捕集容器をセットした後、捕集部分に硝酸5%溶液5mlを加えて、夜間140℃/日中190℃で分解した後、捕集容器を外して蒸発乾固後、濃硝酸5mlを加えた溶解液を脱塩水で定容とし、分解液

表1 試験区の設定

試験区	硫黄資材及び稲わら施用 ²⁾ の有無	
	硫黄資材	稲わら
I	有	有
II	有	無
III	無	有
IV	無	無

²⁾ポット当たり施用量：硫黄資材1.2g(10a当たり60kg相当)
稲わら8g(10a当たり400kg相当)

とした。

2. 試験2 (2021年)

試験1では灌がい水に用いた水道水中に硫黄が含まれていたため、試験2では灌がい水に脱塩水を用いたほか、土壌中の硫黄可給性に影響すると考えられる土壌の酸化還元電位及び土壌溶液中の硫黄濃度を調査項目に加えてポット試験を行い、硫黄資材及び稲わら施用の有無が、水稻の生育や、硫黄欠乏症発生の有無及び水稻茎葉中の硫黄含有率に及ぼす影響を調査し、各要因の寄与率及び要因間の関係性を検討した。

(1) ポット試験

試験2では、土壌の酸化還元電位及び土壌溶液中の硫黄濃度について、移植後から収穫前までの推移を調べた。土壌の酸化還元電位は、白金電極をあらかじめ地表面から5cmの深さに挿入しておき、地表面の比較電極との電位差を、携帯用酸化還元電位差計（東亜ディーケーケー株式会社製ORPメーター、RM-20P）を用いて測定した。測定は1区当たり2連で行い、同一の深さで測定した地温で補正した。土壌溶液は鳥山・石田(1987)の方法により、熱電対用磁製絶縁管をポーラスカップとして土壌に埋設し、タイゴンチューブを通じて医療用真空採血管で採取した。ポーラスカップは、鉛直方向に吸引部分が作土では深さ1～7cmとなるように設置した。採取した土壌溶液は孔径0.45 μmのメンブレンフィルターでろ過後、適宜希釈して、ICP発光分析法により硫黄濃度を測定した。

ポット試験は、試験1と同じ赤磐市内の現地の水田土壌を5月7日に採取し、ワグネルポット（0.02 m²）に乾土換算で2.79 kg充てんした。試験区として硫黄資材施用の有無と稲わら施用の有無を組み合わせた4区を設け（表1）、1区1ポット、12反復で試験を開始した。ポットは試験1と同様に配置した。硫黄資材や稲わら、肥料とそれらの施用量は試験1と同じとした。硫黄資材及び稲わら、肥料は6月18日に施用して、脱塩水で湛水後に代かきを行った。6月21日に水稻‘きぬむすめ’の稚苗（2本苗）を移植した。試験2では灌水に脱塩水を用い、栽培期間中、蒸発散に伴い減少した水は脱塩水で補給して、常に湛水状態を維持した。なお、脱塩水中に硫黄は検出されなかった。

生育調査は7月14日、8月2日、8月26日に草丈、茎数、葉色を測定した。収穫期に当たる10月5日には稈長、穂長、穂数を測定した。試験1と同様、生育調査後に各区3ポットを植物体の分析に供した。生育調査の反復数も同様に、7月14日時点では12、8月2日時点では9、8月26日時点では6、10月5日時点では3となった。

(2) 土壌及び植物体の分析方法

試験1の方法と同じとした。

3. 統計処理

統計処理ソフトEZR on R commander（Kanda, 2013）を用いて、各試験年における生育調査結果並びに、茎葉中の硫黄含有率及び硫黄吸収量に対して、硫黄資材及び稲わらを要因とする分散分析を行った。また、2か年の移植約1か月後の茎葉中の硫黄含有率及び収穫期までの硫黄吸収量について、試験年次を加えた3要因の分散分析を行った。

結果

1. 硫黄資材及び稲わらの施用試験（2020年）

(1) 供試土壌の可給態硫黄含量と重金属含量

ポット試験に供試した土壌の可給態硫黄含量は乾土1kg当たり7.3mgと、水田・大家（2022）が示す可給態硫黄含量の診断基準（20mg）を下回った。可給態硫黄と重金属の物質質量比は0.10で、硫黄量が重金属量を大きく下回り、硫黄が難溶化するため、硫黄の可給性が低い土壌であることが示された。

(2) 生育及び収量調査結果

硫黄資材を施用せず、稲わらを施用したⅢ区（S無/わら有）で、移植後の活着が他の区に比べて遅れ、生育の差は次第に顕著となった。そして、7月15日の時点ではⅢ区（S無/わら有）で草丈や茎数が他の区に比べて有意に劣り、葉色値に有意差はないものの、下葉の黄化が目立つといった硫黄欠乏症状を呈した（表2）。一方で、可給態硫黄含量が欠乏域にある土壌を供したにも関わらず、Ⅳ区（S無/わら無）では硫黄欠乏症状は認められなかった。

概ね最高分けつ期に当たる7月28日以降の生育調査結果の分散分析によると、硫黄資材及び稲わらの主効果及び交互作用は生育に有意な影響を及ぼした（表2）。すなわち、稲わらを施用した条件下では草丈や茎数はⅠ区（S有/わら有）でⅢ区（S無/わら有）を上回った。Ⅰ区（S有/わら有）の草丈や茎数は、稲わらを施用していないⅡ区（S有/わら無）やⅣ区（S無/わら無）と同等であった。このように、稲わらを施用した条件下で硫黄資材の施用効果は顕著であったが、稲わらを施用していない条件下では硫黄資材の施用効果は判然としなかった。そして、収穫期にあたる10月2日時点においてもⅢ区（S無/わら有）で、他の区に比べて穂数が有意に少なかった（表3）。一方、7月28時点の葉色は、草丈や茎数と同様に、Ⅰ区（S有/わら有）でⅢ区（S無/わら有）を上回り、稲わらを施用していないⅡ区（S

有/わら無) やⅣ区 (S無/わら無) と同等であったが、8月25日時点では逆にⅢ区 (S無/わら有) の葉色が他の区を上回った (表2)。

収量調査結果とその分散分析によると、硫黄資材の主効果はもみ重、稲わらの主効果及び交互作用は穂数及びもみ重に対して有意な影響を及ぼした (表3)。すなわち、稲わらを施用した条件下では穂数やもみ重はⅠ区 (S有/わら有) でⅢ区 (S無/わら有) を上回り、

稲わらを施用していないⅡ区 (S有/わら無) やⅣ区 (S無/わら無) と同等であったように、稲わらを施用した条件下で硫黄資材の施用効果は顕著であったが、稲わらを施用していない条件下において施用効果は判然としなかった (表3)。

(3) 硫黄含有率及び硫黄吸収量

水稻茎葉中の硫黄含有率は生育初期に高く、生育が進むにつれて低下する傾向を示した。7月15日時点にお

表2 生育調査結果 (試験1: 2020年)

試験区	硫黄 資材 (A)	稲 わら (B)	草丈		茎数			葉色		
			7/15	7/28	7/15	7/28	8/25	7/15	7/28	8/25
			(cm)		(pot ⁻¹)			(SPAD値)		
I	有	有	45 b ^z	64 a	11 a	26 a	26 a	37.6 a	39.7 a	34.8 b
II	有	無	51 a	67 a	12 a	32 a	26 a	37.5 a	39.0 a	32.9 b
III	無	有	41 c	53 b	6 b	12 b	13 b	34.9 a	35.2 b	43.2 a
IV	無	無	51 a	65 a	11 a	31 a	26 a	37.3 a	39.4 a	34.1 b
二元配置分散分析 ^y										
		A	*	***	***	***	***	n.s.	*	***
		B	***	***	***	***	***	n.s.	*	***
		A×B	n.s.	***	**	***	***	n.s.	**	***

^z Tukeyの多重比較により異なる英文字間に5%水準で有意差があることを示す

^y 分散分析 (***: 0.1%水準, **: 1%水準, *: 5%水準, n.s.: 有意差なし)

表3 収穫期の調査結果 (試験1: 2020年)

試験区	硫黄 資材 (A)	稲 わら (B)	穂数 (pot ⁻¹)	稈長 (cm)	穂長 (cm)	乾物	
						わら重	もみ重
(g pot ⁻¹)							
I	有	有	24 ab ^z	59 a	15.9 a	28.4 a	39.4 a
II	有	無	25 a	59 a	15.3 a	28.9 a	37.6 a
III	無	有	17 b	59 a	16.4 a	22.4 a	25.8 b
IV	無	無	26 a	60 a	14.9 a	29.3 a	39.9 a
二元配置分散分析 ^y							
		A	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	**
		B	*	n.s.	n.s.	n.s.	**
		A×B	*	n.s.	n.s.	n.s.	**

^z Tukeyの多重比較により異なる英文字間に5%水準で有意差があることを示す

^y 分散分析 (**: 1%水準, *: 5%水準, n.s.: 有意差なし)

いて、硫黄欠乏症状を呈したⅢ区（S無/わら有）では、硫黄含有率及び吸収量が他の区に比べて有意に低かった（表4）。

その後、7月28日時点の硫黄含有率は、硫黄資材を施用したⅠ区（S有/わら有）及びⅡ区（S有/わら無）に比べて、硫黄資材を施用していないⅢ区（S無/わら有）及びⅣ区（S無/わら無）で有意に低く、吸収量も少ない傾向であった。その後、硫黄含有率は生育前半に低かったⅢ区（S無/わら有）で他の区に比べて高く推移した。硫黄吸収量についても、硫黄資材を施用したⅠ区（S有/わら有）及びⅡ区（S有/わら無）に比べて、

硫黄資材を施用していないⅢ区（S無/わら有）及びⅣ区（S無/わら無）で劣っていたものの、収穫期とした10月2日時点の吸収量には試験区間で有意な差は認められなかった（表4）。

2. 硫黄資材及び稲わらの施用試験（2021年）

(1) 供試土壌の可給態硫黄含量と重金属含量

ポット試験に供試した土壌の可給態硫黄含量は乾土1kg当たり10.1mgと可給態硫黄含量の診断基準（20mg）を下回った。可給態硫黄と重金属の物質質量比は0.37で、試験1と同様に、硫黄量は重金属量を下回り、硫黄が難溶化するため、硫黄の可給性が低い土壌であることが

表4 水稻の硫黄含有率及び吸収量（試験1：2020年）

試験区	硫黄資材 (A)	稲わら (B)	硫黄含有率 (S%)				硫黄吸収量 (Smg pot ⁻¹)			
			7/15	7/28	8/25	10/2	7/15	7/28	8/25	10/2
I	有	有	0.28 b ^z	0.14 a	0.085 ab	0.074 b	2 ab	26 b	44 a	50 a
II	有	無	0.44 a	0.17 a	0.074 b	0.067 bc	6 a	36 a	40 ab	45 a
III	無	有	0.16 c	0.10 b	0.111 a	0.087 a	1 b	7 d	22 b	42 a
IV	無	無	0.44 a	0.10 b	0.077 b	0.061 c	6 a	21 bc	32 ab	42 a

二元配置分散分析 ^y										
	A		*	***	*	ns	ns	***	*	ns
	B		***	ns	**	***	***	***	ns	ns
	A×B		*	ns	ns	**	ns	ns	ns	ns

^z Tukeyの多重比較により異なる英文字間に5%水準で有意差があることを示す

^y 分散分析 (***:0.1%水準, **:1%水準, *:5%水準, n.s.:有意差なし)

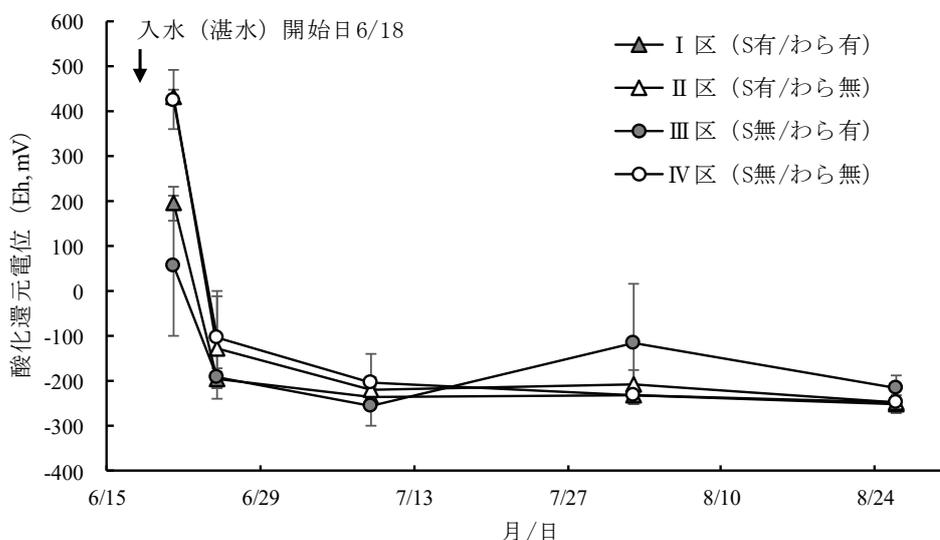


図1 硫黄資材及び稲わら施用の有無が土壌の酸化還元電位 (Eh) の推移に及ぼす影響（試験2：2021年）

注) 図中バーは標準偏差

示された。

(2) 土壌の酸化還元電位の推移

全ての試験区において土壌の酸化還元電位（以下、Ehとする）は、入水3日後の6月21日時点ではプラスの値を示したが、入水7日後の6月25日時点ではマイナスの値を示し、還元状態となった（図1）。さらに、入水21日後の7月9日時点では通常の湛水条件下の水田で見られる-200mV以下に達した（図1）。入水後のEhの推移に関して、稲わらを施用したI区（S有/わら有）及びIII区（S無/わら有）では、稲わらを施用していないII区（S有/わら無）及びIV区（S無/わら無）に比べて、Ehが-200mV以下に低下するのが早かった（図1）。

(3) 土壌溶液中の硫黄濃度の推移

いずれの試験区においても土壌溶液中の硫黄濃度は、入水3日後の6月21日、もしくは入水10日後の6月28日をピークに、生育の経過とともに低下した（図2）。入水26日後の7月14日時点では、II区（S有/わら無）で25mg L⁻¹程度であったが、その他の試験区では1mg L⁻¹程度まで低下し、入水47日後の8月4日時点では全ての試験区で1mg L⁻¹前後となり、以降は収穫期にかけてはほぼ同程度の濃度で推移した（図2）。こうした土壌溶液中の硫黄濃度の推移に関して、硫黄資材を施用したI区（S有/わら有）及びII区（S有/わら無）に比べて、施用していないIII区（S無/わら有）及びIV区（S無/わら無）で硫黄濃度は低く推移した（図2）。また、硫黄資材を施用したI区（S有/わら有）とII区（S有/わら無）との比較、硫黄資材を無施用としたIII区（S無/わら有）とIV区（S無/わら無）との比較では、稲わらを施用し

たI区（S有/わら有）及びIII区（S無/わら有）で硫黄濃度が低く推移した（図2）。

(4) 生育及び収量調査結果

試験1と同様に、硫黄資材を施用せず、稲わらを施用したIII区（S無/わら有）では、移植後の活着が他の区に比べて遅れ、生育の差は次第に顕著となった。そして、7月14日時点では草丈や茎数及び葉色が他の区に比べて有意に劣り、下葉の黄化を伴う硫黄欠乏症状を呈した（表5）。また、7月14日時点において、硫黄資材を施用し、稲わらを施用したI区（S有/わら有）では、III区（S無/わら有）に次いで草丈や茎数及び葉色が劣り（表5）、硫黄欠乏症状を呈したものの、その発症程度はIII区（S無/わら有）に比べて軽度であった。なお、7月14日時点では試験1と同様に、IV区（S無/わら無）では供試土壌の可給態硫黄含量が欠乏域であったにも関わらず、硫黄欠乏症状は認められなかったが、8月2日以降はIII区（S無/わら有）に次いで茎数の増加が抑制された（表5）。

8月2日以降の生育調査結果の分散分析において、表5のとおり、草丈に対しては硫黄資材の主効果のみが有意で、硫黄資材を施用しなかったIII区（S無/わら有）及びIV区（S無/わら無）に比べて、硫黄資材を施用したI区（S有/わら有）及びII区（S有/わら有）で草丈が有意に高かった。茎数に対しては両主効果が有意で、硫黄資材を施用しなかったIII区（S無/わら有）及びIV区（S無/わら無）に比べて、硫黄資材を施用したI区（S有/わら有）及びII区（S有/わら有）で茎数が有意に多かった。稲わらの有無について、I区（S有/わら有）

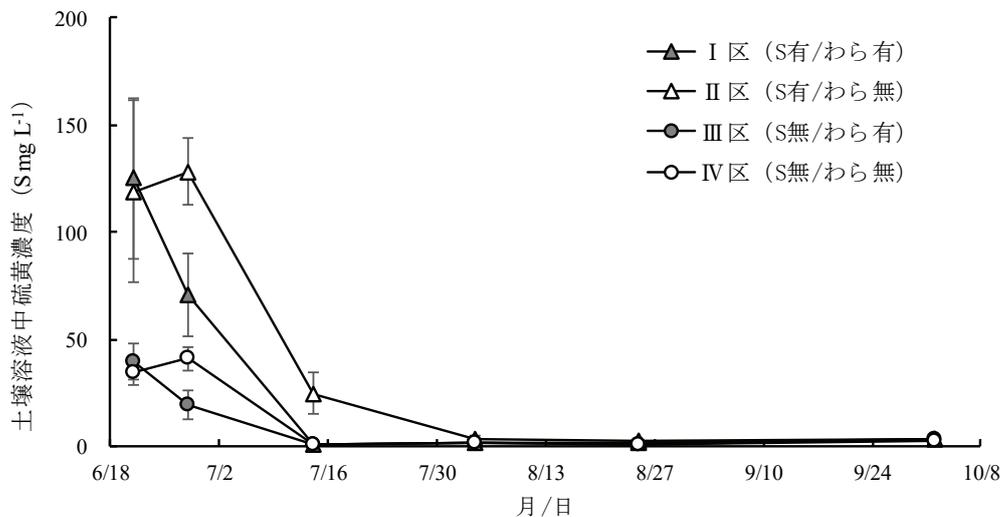


図2 硫黄資材及び稲わら施用の有無が土壌溶液中硫黄濃度の推移に及ぼす影響（試験2：2021年）

注) 図中バーは標準偏差

とⅡ区(S有/わら有)の間、Ⅲ区(S無/わら有)とⅣ区(S無/わら無)の間で、稲わら無施用の場合に茎数が多い傾向が認められた。8月2日時点の葉色に対して交互作用が有意であり、硫黄資材を施用したⅠ区(S有/わら有)及びⅡ区(S有/わら無)では葉色に稲わら施用の有無による有意な差は認められないものの、硫黄資材を施用しなかったⅢ区(S無/わら有)及びⅣ区(S無/わら無)では、稲わらを施用したⅢ区(S無/わら有)で葉色値が有意に高かった。8月26日時点の葉色に対しては両

主効果が有意で、硫黄資材を施用したⅠ区(S有/わら有)及びⅡ区(S有/わら有)に比べて、硫黄資材を施用しなかったⅢ区(S無/わら有)及びⅣ区(S無/わら無)で葉色値が有意に高かった。稲わらの有無について、Ⅰ区(S有/わら有)とⅡ区(S有/わら有)の間、Ⅲ区(S無/わら有)とⅣ区(S無/わら無)の間で、稲わらを施用した場合に葉色値が高い傾向が認められた。

収量調査結果とその分散分析によると、硫黄資材は穂数や、穂長、わら重及びもみ重に対して、稲わらは

表5 生育調査結果(試験2:2021年)

試験区	硫黄 資材 (A)	稲 わら (B)	草丈		茎数			葉色		
			7/14	8/2	7/14	8/2	8/26	7/14	8/2	8/26
			(cm)		(pot ⁻¹)			(SPAD値)		
I	有	有	49 b ^z	67 a	6 b	30 b	30 a	38.0 b	39.7 a	36.8 b
II	有	無	58 a	65 a	9 a	35 a	33 a	40.2 a	36.7 a	33.7 c
III	無	有	45 c	61 b	6 b	18 d	19 c	34.8 c	40.0 a	41.2 a
IV	無	無	58 a	61 b	8 a	25 c	25 b	39.9 a	30.2 b	38.3 b
二元配置分散分析 ^y										
		A	*	***	**	***	***	***	*	***
		B	***	n.s.	***	***	***	***	***	***
		A×B	**	n.s.	*	n.s.	n.s.	**	*	n.s.

^z Tukeyの多重比較により異なる英文字間に5%水準で有意差があることを示す

^y 分散分析(***:0.1%水準, **1%水準, *:5%水準, n.s.:有意差なし)

表6 収穫期の調査結果(試験2:2021年)

試験区	硫黄 資材 (A)	稲 わら (B)	穂数 (pot ⁻¹)	稈長 (cm)	穂長	乾物	
						わら重	もみ重
(g pot ⁻¹)							
I	有	有	24 a ^z	63 a	14.9 a	13.6 a	33.5 a
II	有	無	28 a	65 a	14.7 a	10.9 ab	33.7 a
III	無	有	17 b	62 a	16.3 a	10.5 ab	25.8 b
IV	無	無	23 ab	62 a	15.7 a	10.1 b	27.3 b
二元配置分散分析 ^y							
		A	**	n.s.	*	*	***
		B	**	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.
		A×B	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.

^z Tukeyの多重比較により異なる英文字間に5%水準で有意差があることを示す

^y 分散分析(***:0.1%水準, **1%水準, *:5%水準, n.s.:有意差なし)

穂数に対して有意な影響を及ぼした(表6)。硫黄資材施用により穂数は多く、穂長は短く、わら及びもみ重は増加する傾向を示した。また、稲わら施用により穂数が少なくなる傾向を示した(表6)。

(5) 硫黄含有率及び硫黄吸収量

硫黄資材及び稲わら施用の有無は、茎葉中の硫黄含有率に対して有意な影響を及ぼした(表7)。7月14日時点の硫黄含有率は、Ⅲ区(S無/わら有)で他の区に比べて有意に低く、次いでⅠ区(S有/わら有)及びⅣ区(S無/わら無)であり、Ⅱ区(S有/わら無)で最も高かった(表7)。8月2日以降も硫黄資材及び稲わら施用の有無は硫黄含有率に有意な影響を及ぼしたが、概して硫黄資材を施用した区で高く、稲わらを施用した区で低く推移する傾向を示した(表7)。

硫黄吸収量に対しても、硫黄資材施用の有無は期間を通じて有意な影響を及ぼし、硫黄資材の施用はプラスの効果を及ぼした。一方で、稲わら施用の有無は7月14日時点においてのみ有意で、マイナスの効果を及ぼした。交互作用は有意でなかった(表7)。

3. 2か年のまとめ

移植約1か月後に葉の黄化や茎数不足として見られる硫黄欠乏症状を呈した区は、灌がい水に水道水を用いた試験1(2020年)ではⅢ区(S無/わら有)のみで、灌がい水に脱塩水を用いた試験2(2021年)ではⅢ区(S無/わら有)及びⅠ区(S有/わら有)であった。この時、茎葉中の硫黄含有率は、試験1のⅢ区(S無/わら有)で0.16%と他の区に比べて有意に低く(表4)、試験2のⅢ

区(S無/わら有)で0.13%、Ⅰ区(S有/わら有)で0.21%と、他の区に比べて有意に低かった(表7)。硫黄欠乏症状を呈した区では移植約1か月後における硫黄吸収量も少なかった(表4, 7)。

その後の生育及び収量について、試験1,2ともにⅢ区(S無/わら有)で明らかに他の試験区に比べて生育が劣り、茎数及び収穫期の穂数が有意に少なく(表2, 5)、もみ重も有意に劣った(表3, 6)。試験2のⅠ区(S有/わら有)は7月14日時点で硫黄欠乏症状を呈したものの、8月2日以降、他の試験区に比べて硫黄含有率は有意に高く、硫黄吸収量も勝ったため(表7)、生育は次第に回復した。収穫期の穂数やわら重及びもみ重はⅡ区(S有/わら無)と同等で、Ⅲ区(S無/わら有)及びⅣ区(S無/わら無)を上回った(表6)。これに対し、試験2のⅣ区(S無/わら無)では8月2日以降に硫黄含有率は低く、硫黄吸収量も劣り(表7)、収穫期の穂数やわら重及びもみ重はⅠ区(S有/わら有)及びⅡ区(S有/わら無)を下回った(表6)。これらのことに関連して、収穫期における硫黄吸収量ともみ重の間には、有意な正の相関関係($r=0.723$, p 値0.042)が認められ、収穫期までの硫黄吸収量が多いほど、もみ重が増大する傾向が認められた。

4. 水稻の硫黄吸収に係る有意な要因と寄与率

硫黄欠乏症対策に係る合理的な肥培管理法を策定する上で、硫黄吸収に対する硫黄資材及び稲わら施用の有無、試験年次の影響など各要因の寄与率並びに要因間の関係性を把握しておく必要がある。そこで、2か年

表7 水稻の硫黄含有率及び吸収量(試験2:2021年)

試験区	硫黄資材(A)	稲わら(B)	硫黄含有率(S%)				硫黄吸収量(Smg pot ⁻¹)			
			7/14	8/2	8/26	10/5	7/14	8/2	8/26	10/5
I	有	有	0.21 b ^z	0.14 a	0.09 a	0.09 a	3 bc	29 a	45 a	41 a
II	有	無	0.35 a	0.10 b	0.08 ab	0.08 a	9 a	33 a	44 a	36 a
III	無	有	0.13 c	0.11 b	0.07 bc	0.06 b	1 c	12 b	23 b	22 b
IV	無	無	0.23 b	0.08 c	0.06 c	0.05 b	5 b	11 b	23 b	20 b
二元配置分散分析 ^y										
A			***	***	***	***	**	***	***	***
B			***	***	*	*	***	n.s.	n.s.	n.s.
A×B			*	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.

^z Tukeyの多重比較により異なる英文字間に5%水準で有意差があることを示す

^y 分散分析(***:0.1%水準, **1%水準, *:5%水準, n.s.:有意差なし)

実施したポット栽培試験の結果をもとに検討した。

(1)移植約1か月後の硫黄含有率

硫黄欠乏症状の発生に関与すると考えられる移植約1か月後における硫黄含有率について、試験年次を加えた3要因の分散分析を行い、有意な要因と寄与率を調べた(図3)。その結果、硫黄含有率に対する有意な主効果の寄与率は、稲わらで54.8%と最も高く、試験年次で19.9%、硫黄資材で11.9%の順であった(図3)。入水直前の稲わらすき込みは、この時期の硫黄含有率を低下させる効果が大いことが示された。次の試験年次に関して、気象条件以外の違いは、灌がい水に用いた水の種類とポット当たりの土壌量の二つである。灌がい水について、試験1では4mg L⁻¹超の硫黄が含まれている水道水を用い、試験2では硫黄を含まない脱塩水を用いた。一方、ポット当たりの土壌量について、試験1では2.40kg、試験2では2.79kgを充てんした。土壌量が多いほど土壌由来の硫黄供給量は多いと考えられるが、移植約1か月後の硫黄含有率は試験1に比べて試験2で低い傾向にあったことから(図3)、試験年次の影響は主に気象条件もしくは灌がい水の硫黄濃度の違いによるものと判断した。硫黄資材に関して、移植約1か月後の硫黄含有率は、いずれの区においても硫黄資材施用により高まるが、その寄与率は稲わら施用や試験年次に比べて低いことから、硫黄資材の施用効果に比べて、稲わら等の易分解性有機物の存在や試験年次が、この時期の硫黄含有率に大きく影響したと推測された(図3)。

(2)収穫期の硫黄吸収量

同様に、収穫期までのポット当たり硫黄吸収量についても、試験年次を加えた3要因の分散分析を行い、有意な要因と寄与率を調べた(図4)。その結果、硫黄吸収量に対する有意な主効果の寄与率は、試験年次が50.3%、硫黄資材施用の有無が28.3%であった(図4)。収穫期の硫黄吸収量は、灌がい水に硫黄を含まない脱塩水を用いた試験2では20～41mgであったのに対して、4mg L⁻¹程度の硫黄を含む水道水を用いた試験1では42～50mgといずれの区においても上回った。また、硫黄資材に関して、試験1では収穫期の硫黄吸収量に試験区間で有意な差は認められなかったものの、試験2で硫黄吸収量は硫黄資材を施用したI区(S有/わら有)で41mg及び、II区(S有/わら無)で36mgであったのに対し、硫黄資材を施用しなかったIII区(S無/わら有)で22mg及び、IV区(S無/わら無)で20mgと明らかに劣った(図4)。このことから、試験1では土壌や硫黄資材だけでなく、灌がい水に由来する硫黄吸収が相当量あったと推察された。これらのことから、試験年次について気象条件の影響は無視できないものの、灌がい水中硫黄濃度の違いが大きいと推測された(図4)。一方、稲わら施用は、移植約1か月後の硫黄含有率を低下させ、硫黄吸収量も同様に低下したものの、収穫期におけるポット当たり硫黄吸収量に対して有意な主要因ではなかった(図3, 4)。2か年ともに、移植約1か月後時点の硫黄吸収量はII区(S有/わら無)に比べてI区(S有/わら有)で、同様にIV区(S無/わら無)に比

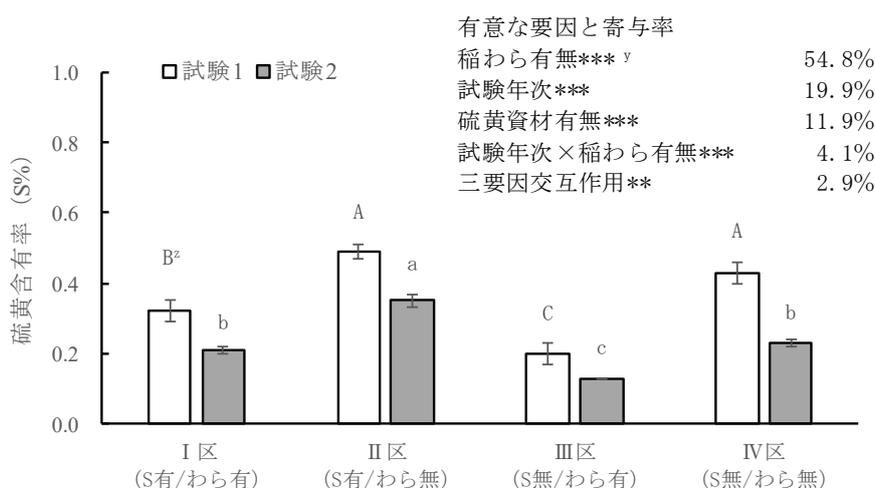


図3 移植約1か月後の硫黄含有率に係る各要因の有意性と寄与率

² Tukeyの多重比較により、異なる文字間(試験1は大文字、試験2は小文字)に5%水準で有意な差があることを示す

^y 分散分析(***: 0.5%水準, **: 1%水準で有意性があることを示す)

注) 図中バーは標準偏差

べてⅢ区（S無/わら有）で有意に低下し、稲わら施用の有無による影響が認められたものの（表4, 7）、収穫期の硫黄吸収量はこれらの区間で有意な差は認められなかった。すなわち、稲わらを施用しなかったⅡ区（S有/わら無）及びⅣ区（S無/わら無）に比べて、稲わらを施用したⅠ区（S有/わら有）及びⅢ区（S無/わら有）の硫黄吸収量は劣るものの、収穫期にかけての硫黄吸収量は、Ⅰ区（S有/わら有）ではⅡ区（S有/わら無）に、Ⅲ区（S無/わら有）ではⅣ区（S無/わら無）に追いつくような推移を示した（表4, 7）。

考 察

本試験では、試験年次間の灌がい水中の硫黄濃度の違いや硫黄資材及び稲わら施用が、水稻の生育や収量、硫黄欠乏症状の発生、茎葉中の硫黄含有率や吸収量に及ぼす影響の程度を検討した。その結果、稲わら施用は根圏における硫黄の可給性を低下させること、試験年次間の灌がい水中硫黄濃度の違い及び硫黄資材施用は、生育中期から後期にかけての硫黄吸収量に影響し、硫黄吸収量ともみ収量との間には有意な正の相関関係があることが示された。

以下に、硫黄欠乏症の発生対策、硫黄欠乏による減収対策、硫黄欠乏の栄養診断基準について論じ、硫黄欠乏対策に係る合理的な肥培管理方法を提案する。

1. 硫黄欠乏症の発生対策

硫黄欠乏症状が発生した現地の水田土壌を供した

ポット栽培試験を2か年実施した結果、移植約1か月後の硫黄含有率に対して、検討した3つの要因のうち稲わら施用の有無が54.8%と最も大きい寄与率を示し、試験年次の寄与率は19.9%、硫黄資材の有無は11.9%であった（図3）。試験2で調査した酸化還元電位や土壌溶液中硫黄濃度の推移から、入水直前に稲わらを施用した場合に、施用しなかった場合に比べて酸化還元電位や硫黄濃度の低下は早かった（図1, 2）。その結果、土壌中で硫酸イオンも還元作用を受けて不可給化し、試験1ではⅢ区（S無/わら有）、試験2ではⅢ区（S無/わら有）及びⅠ区（S有/わら有）で移植後の活着が不良となり、硫黄欠乏症状の発生に至ったと推察された。滋賀県内においても有機成分を含むペースト肥料を用いた場合に硫黄欠乏が発生したことを辻（2000a,b,c）が報告しており、同様の機作によるものと考えられた。広島県（2025）は60圃場で可給態硫黄含量と硫黄欠乏発生の有無を調査し、可給態硫黄含量が 10mg kg^{-1} 未満と欠乏域にある圃場でも、硫黄欠乏症が必ずしも発生しないことを報告しており、稲わらのすき込み時期の違いによる土壌の還元程度が硫黄欠乏症発生の有無に影響した可能性も考えられる。一方で、本試験で認められた移植後の活着不良は土壌の還元と硫黄濃度の低下の両方が要因と考えられ、硫黄資材の施用により活着が改善される可能性も考えられるが、一般的にも入水後の急激な土壌の還元は避けるべきである。以上のことから、水稻単作田における土壌管理として、稲わらのすき込

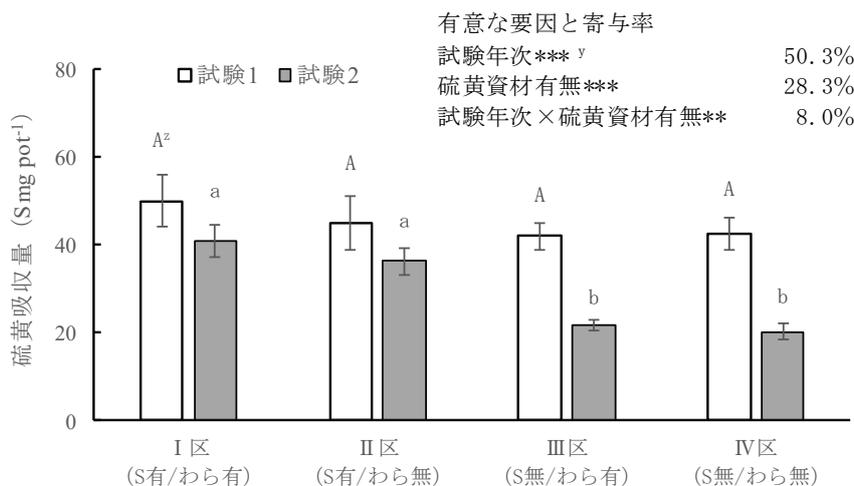


図4 収穫期の硫黄吸収量に係る各要因の有意性と寄与率

^z Tukeyの多重比較により、異なる文字間（試験1は大文字、試験2は小文字）に5%水準で有意な差があることを示す

^y 分散分析（***：0.5%水準，**：1%水準で有意性があることを示す）

注) 図中バーは標準偏差

みが可能な期間は前作収穫後から次作の入水時までと6か月前後にわたるが、収穫後の地温が高い秋期に稲わらをすき込み、土壤中で十分に分解させることが、硫黄欠乏対策として有効と考えられた。

2. 硫黄欠乏による減収対策

2か年のポット栽培試験の結果、収穫期までの硫黄吸収量ともみ収量には有意な正の相関関係が認められ、硫黄吸収量の不足はもみ収量の低下に繋がることが示された。収穫期までの硫黄吸収量に対して、検討した3つの要因のうち、試験年次が50.3%と最も大きい寄与率を示し、次に硫黄資材の有無で28.3%であった(図4)。試験年次については気象条件の影響は無視できないものの、これまで述べたように用いた灌がい水中硫黄濃度の違いによる影響が大きいと考えられる。また、硫黄欠乏症が発生する移植約1か月後の硫黄含有率に関する報告は多くあるが、収穫期までの硫黄吸収量ともみ収量について検討した報告はない。硫黄欠乏症の発生が甚大な場合を除いて、通常の水田での栽培では中干期を過ぎると水稻の生育が回復するため、収量への影響が少ないとされてきたことによると考えられる。ポット栽培による本試験では中干をせず、入水から収穫まで常時湛水管理を行った。試験2のみの測定ではあるが、収穫期まで酸化還元電位は還元状態を、土壤溶液中の硫黄濃度は低い値を維持していることから(図1, 2)、中干を行う水田での栽培に比べて、土壤中の硫黄可給性及び水稻による硫黄吸収量は少なかったと考えられる。ここで、試験1では生育期間を通じて、灌がい水による硫黄供給があったと考えられるが、灌がい水による硫黄供給が無かった試験2では生育後半に水稻が吸収した硫黄の供給源は不明である。米山ら(1990)は水稻の根量が多いとリン酸の吸収が増加したと報告しているほか、Takagi(1976)は、イネ科植物は根から有機酸を分泌し、根圏土壌のpHを低下させ、難溶性の養分を可溶化させることで効率的に吸収していることを報告している。このことから、試験2の稲わらを施用したI区(S有/わら有)及びIII区(S無/わら有)における生育後半の硫黄吸収は、根が分泌する有機酸により、難溶化した硫黄が可溶化するとともに、拡大した根系により吸収されたと推測された。

灌がい水中の硫黄濃度に関して、著者らは前報(大家ら, 2024)で本県南部の農業用水中の硫黄濃度は平均 3.4mg L^{-1} であり、中生品種の栽培に要する灌がい水量を10a当たり1,200tとした場合、灌がい水に由来する硫黄量は同 4.1kg と試算した。文献値(辻, 2000b; 小野寺ら, 2011; 桐山ら, 2022; 安井ら, 2022)での水

稲の吸収量は同 $0.8 \sim 1.7\text{kg}$ であることから、本県南部では灌がい水のみによる硫黄供給量で水稻の硫黄吸収量を充足できると考えられる。しかし、木下・松田(2001)による県内の主要3河川の水質調査結果や、水田ら(2023)が県内水田23地点の灌がい水中硫黄濃度を調査した結果によると、河川の上流域や標高が高い地点ほど硫黄濃度が低く、 1mg L^{-1} を下回る場合があること、河川の下流域や標高が低い地点ほど硫黄濃度が高い傾向にあることを報告している。また、桐山・横田(2023)は岩手県内30地点で灌がい水中の硫黄濃度を調査し、平均 10.4mg L^{-1} (最小 $1.1 \sim$ 最大 40.8)と地点によって大きく異なることを報告している。水田・大家(2021)は灌がい水中の硫黄濃度が 3mg L^{-1} を下回る水田で硫黄欠乏症の発生が多いことを報告している。今後、様々な地点で灌がい水中の硫黄濃度と水稻の硫黄吸収量の関係を調査し、硫黄吸収量を充足することが可能な灌がい水中硫黄濃度を明らかにすることも重要と考えられた。このように、水田における硫黄の可給性を評価するためには、土壤中の可給態硫黄含量以外に、資材施用による硫黄投入量のほか、灌がい水中の硫黄濃度を考慮することが重要であると考えられた。

3. 硫黄欠乏の栄養診断基準

硫黄は、作物の窒素代謝に大きく影響することが報告されており(鈴木, 1977)、茎葉中の硫黄含有率に係る栄養診断基準を明らかにするため、2か年の結果をもとに、移植約1か月後の硫黄含有率と窒素含有率との関係を検討した(図5)。硫黄含有率が低く、硫黄欠乏症状を呈した試験1のIII区、試験2のIII区及びI区では、他の区に比べて窒素含有率が低下する傾向を示した(図5)。硫黄欠乏症状を呈した水稻は下葉が黄化して、分けつが少ないなど窒素欠乏と類似した症状を呈することが知られており、こうした窒素含有率の低下が認められることも植物生理的な硫黄欠乏症の特徴と考えられた。また、試験2のIV区は外観上の硫黄欠乏症状は認められなかったものの、8月2日以降に硫黄含有率が低下し、硫黄吸収量も劣り(表7)、収穫期の穂数やわら重及びもみ重が低下する(表6)など、硫黄欠乏が原因とみられる生育や収量の低下が認められた。図5で移植約1か月後の硫黄や窒素含有率は試験2のIV区でわずかながら低い傾向にあったことから、硫黄含有率の低下に伴い窒素含有率の低下が顕著となる水準、つまり破線矢印が示す硫黄 0.23% 、窒素 3.4% 付近が生理的な硫黄欠乏水準ではないかと考えられた。一方、外観で明らかな硫黄欠乏症状を呈する水準は硫

黄含有率0.16%付近（実線矢印）と考えられた（図5）。また、図6に窒素含有率と窒素/硫黄比の関係を示した。生理的な硫黄欠乏水準を硫黄0.23%とした場合に、窒素/硫黄比は15程度であった。これまでに報告されている水稻茎葉中の硫黄含有率に係る診断基準に関して、Dobermann and Fairhurst（2000）は栄養成長期の茎葉部硫黄含有率が0.15%を超えると硫黄施肥への応答がみられないとし、硫黄欠乏の目安を茎葉部硫黄含有率が0.10%未満もしくは窒素/硫黄比が15～20を超える場合としている。また、辻（2000b）は分けつ期茎葉部の硫黄含有率が0.12～0.13%未満、窒素/硫黄比21～25を超える場合としている。今回の試験で得られた硫黄欠乏に係る栄養診断基準はこれまでに報告されている値と大きく異ならなかったことから、妥当であると考えられた。

4. 硫黄欠乏対策に係る合理的な肥培管理方法の提案

国内における水稻の硫黄欠乏症に関する報告は、滋賀県の辻（2000a,b,c）の詳細な報告をはじめとして、宮城県（小野寺ら，2011；長谷川，2015）、岡山県（大家ら，2017）、岐阜県（棚橋ら，2016）、岩手県（古屋ら，2017）、秋田県（中川ら，2019）、広島県（広島県西部農業技術指導所，2025）と年次を経るごとに増加している。各地で硫黄欠乏症の発生要因の究明と対策試験を行うなかで、必ずしも土壤の可給態硫黄量だけで欠乏症の発生を予測できないことが多かった。また、対策として重要な硫黄資材の施用効果が判然としない場

合も多い。菅野（2019）が指摘するように、硫黄欠乏症の発生には、土壤や施用する資材及び、灌がい水に由来する硫黄供給量以外に、土壤中の鉄以外の可溶性金属元素（亜鉛、鉛、カドミウム、銅）による難溶性の金属硫化物の形成や、易分解性有機物の存在による土壤の還元化進行など様々な要因が関与するとされている。このうち、本試験では硫黄資材施用の有無、易分解性有機物である稲わらの入水直前の施用の有無、試験年次間の灌がい水中の硫黄濃度の違いが硫黄欠乏症の発生や水稻による硫黄吸収に及ぼす影響を調査した。その結果、硫黄欠乏症の発生に影響する移植約1か月後の硫黄含有率に対しては（図3）、硫黄資材施用の有無よりも稲わら施用の有無や試験年次間の灌がい水中の硫黄濃度の違いによる影響が大きいこと、収穫期までの硫黄吸収量に対しては（図4）、硫黄資材施用の有無よりも春期の稲わら施用の有無や灌がい水中の硫黄濃度の違いによる影響が大きいことを明らかにした。すなわち、易分解性有機物の存在は硫黄資材の施用効果を抑制するため、稲わらのすき込みを秋期に行うことが重要であるとともに、土壤の可給態含量だけでなく灌がい水中の硫黄濃度が低い場合には硫黄資材を施用することが必須であると考えられた。

5. まとめ

今回、土壤中の重金属量が硫黄量を上回る土壤を用い、また、土壤の還元化がより速やかに進むよう、稲わらのすき込みを入水直前に行うことで硫黄欠乏症状

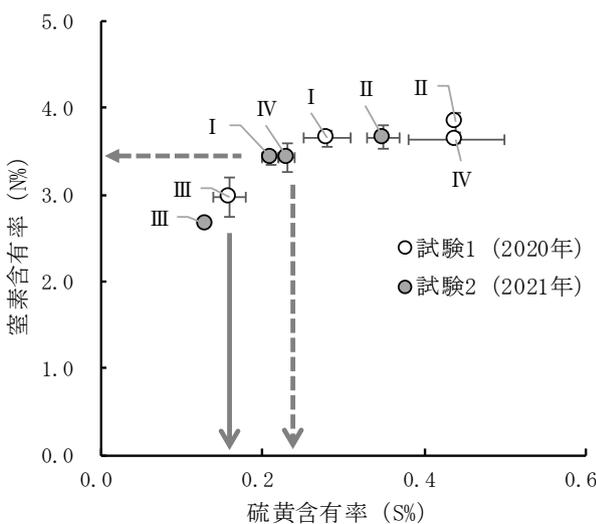


図5 硫黄含有率と窒素含有率の関係

注) マーカーのバーは標準偏差、
矢印（破線）は生理的な硫黄欠乏水準、
矢印（実線）は外見による硫黄欠乏水準を示す

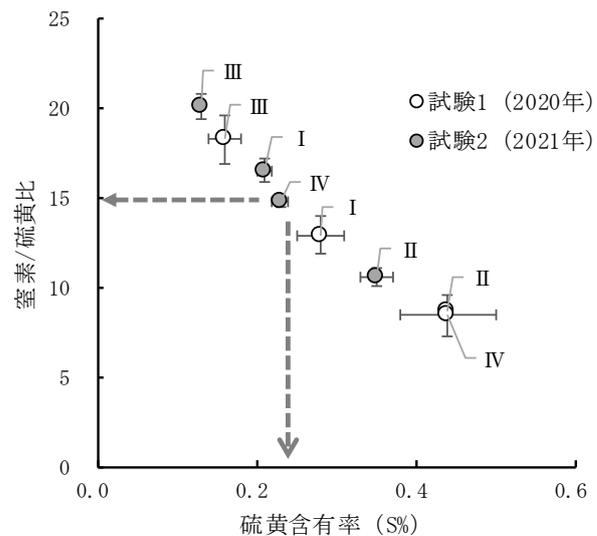


図6 硫黄含有率と窒素/硫黄比の関係

注) マーカーのバーは標準偏差、
矢印（破線）は生理的な硫黄欠乏水準を示す

が発生しやすい条件を再現して、硫黄資材及び稲わらの有無、試験年次間の灌がい水中の硫黄濃度の違いによる影響を検討した。その結果、稲わら施用は入水後の土壤還元化を促し、土壤溶液中硫黄濃度を低下させたことから、稲わらすき込みから入水までの期間が短い場合、根圏における硫黄の可給性が早く低下することが明らかとなった。また、試験年次間の灌がい水中硫黄濃度の違いや硫黄資材施用は、生育中期から後期にかけての硫黄吸収量に対して影響が大きく、硫黄吸収量が少ない場合にもみ収量にも影響することが明らかとなった。これらのことから、硫黄欠乏症が発生する水田では応急対策として硫黄資材の施用が有効である一方、稲わらのすき込みは可能な限り秋期に行っておくことが重要と考えられた。

摘 要

1) 硫黄欠乏症対策に係る合理的な肥培管理法を策定するため、硫黄欠乏症状が発生した現地の水田土壤を供したポット栽培試験を2か年実施し、試験年次間の灌がい水中の硫黄濃度の違い、硫黄資材及び稲わら施用の有無等の各要因が、水稻の生育や収量、硫黄欠乏症状の発生、茎葉中の硫黄含有率や吸収量に及ぼす影響の程度を検討した。

2) 灌がい水に硫黄を含んだ水道水を用いた試験1(2020年)ではⅢ区(S無/わら有)、灌がい水に硫黄を含まない脱塩水を用いた試験2(2021年)ではⅢ区(S無/わら有)及びⅠ区(S有/わら有)において、移植約1か月の硫黄含有率は低く、硫黄欠乏症状を呈した。硫黄含有率に対する有意な主要因の寄与率は、稲わら施用の有無で54.8%と最も高く、試験年次で19.9%、硫黄資材の有無で11.9%の順であった。

3) 収穫期における硫黄吸収量ともみ重との間には、正の相関関係($r=0.723$, $n=8$, p 値0.042)が認められ、収穫期までの硫黄吸収量が多いほど、もみ重が増大する傾向が認められた。硫黄吸収量に対する有意な主要因の寄与率は、試験年次で50.3%と最も高く、硫黄資材施用の有無で28.3%の順であった。

4) 水稻茎葉の硫黄栄養に対して、生育初期では稲わら等易分解性有機物の存在が大きい一方、生育中期以降は灌がい水や資材等で供給される硫黄量の影響が大きいことが示された。

引用文献

浅見輝男(1992) 秋落ち水田, 農業土木学会誌60 : p51
Dobermann, A. and Fairhurst, T. (2000) Rice: Nutrient

Disorders and Nutrient Management. Handbook Series, International Rice Research Institute, Los Baños, Phillippines

古屋聡・菅野均志・横田紀雄・小田島芽里・渡邊紀之・多田周平・南條正巳(2017) 岩手県沿岸南部地域の津波復旧水田作土における水稻の石膏施与への応答, 日本土壤肥料学会2017年度仙台大会講演要旨集 63 : 95

長谷川榮一・島秀之・小野寺和英・相川良雄・南條正巳(2015) 農業および園芸90(5) : 525-534

広島県西部農業技術指導所, 広島県における水稻硫黄欠乏の発生状況と対策,

<https://www.pref.hiroshima.lg.jp/uploaded/attachment/459178.pdf> (2025. 10検索))

Kanda Yoshinobu (2013) Investigation of the freely available easy-to-use software 'EZR' for medical statistics, Bone Marrow Transplantation 48 : 452-458

木下卓也・松田敏彦(2001) 岡山県の主要3河川の水質と地質の関係, 岡山大学地球科学研究報告, 8 (1):29-38.

桐山直盛・高橋良学・伊藤美穂(2022) 可給態硫黄含量が低い土壌における水稻の生育・収量と硫黄資材の施用効果, 東北農業研究75 : 23-24

桐山直盛・横田紀雄(2023) 県内水田における灌漑水からの硫黄供給量, 令和4年度 岩手県農業研究センター試験研究成果書,

https://www.pref.iwate.jp/agri/_res/projects/project_agri/_page/_002/006/742/r04shidou_08.pdf (2025.10検索)

水田有亮・森次真一・大家理哉(2023) 県内水田の可給態硫黄含量及び灌がい水中の硫黄濃度の実態, 令和4年度試験研究主要成果 : 3-4,

https://www.pref.okayama.jp/uploaded/life/864045_8209132_misc.pdf (2025.10検索)

水田有亮・大家理哉(2021) 水稻の硫黄欠乏症の診断基準, 令和3年度試験研究主要成果 : 13-14,

https://www.pref.okayama.jp/uploaded/life/786818_7330698_misc.pdf (2025.10検索)

水野直治・水野隆文(2019) 北海道の水田土壤中イオウと遊離酸化鉄含有率の分布, 農業および園芸94(7) : 586-593

中川進平・田村美樹・伊藤千春・渡辺恭平・伊藤正志(2019) 水稻の硫黄欠乏に対する石膏施用の効果, 日本土壤肥料学会2019年度静岡大会講演要旨集65, 109
小野寺和英・島秀之・長谷川榮一(2011) カドミウム汚染圃場における水稻生育停滞の回復技術, 宮城県

古川農試研報9：7-12

大家理哉・水田有亮（2022）水稻の硫黄欠乏症の特徴と対策，令和3年度試験研究主要成果：11-12，

https://www.pref.okayama.jp/uploaded/life/786818_7330697_misc.pdf（2025.10検索）

大家理哉・水田有亮・寺地紘哉（2024）灌がい水及び雨水により水田へ供給される硫黄量の評価，岡山県農林水産総合センター農業研究所研究報告15：39-42

大家理哉・森次真一・赤井直彦（2017）県内水田土壌における可給態イオウ含量と湛水条件下におけるその挙動，日本土壌肥料学会2017年度関西支部講演会講演要旨集64：288

菅野均志（2019）水田土壌の硫黄（S）肥沃度評価に関する一考察，肥料科学41：29-49

鈴木皓（1977）硫黄栄養が作物のアミノ酸代謝におよぼす影響ならびに作物の硫黄栄養の診断法に関する研究，農業技術研究所報告29：49-106

Takagi Seiichi（1976）Naturally Occurring Iron-Chelating Compounds In Oat- and Rice-Root Washings I. Activity Measurement and Preliminary Characterization, Soil Sci. Plant Nutr. 22(4)：423-433

棚橋寿彦・和田巽・加藤誠二・山田隆史・浅野智孝・見城貴志・田中誠二・北嶋敏和（2016）豚ふん堆肥の成分と散布性を改善した成型肥料の開発－第2報 新肥料企画による粒状肥料の開発と利用－，岐阜農技セ報16：26-36.

鳥山和伸・石田博（1987）土壌溶液モニター法による水田土壌中のNH₄-N消失時期の把握，土肥誌58(6)：747-749

辻藤吾（2000a）ペースト肥料による水稻の初期生育抑制障害と障害に対する資材の施用効果，土肥誌71(4)：454-463

辻藤吾（2000b）水稻の硫黄欠乏による栄養障害と硫黄吸収特性，土肥誌71(4)：464-471

辻藤吾（2000c）水稻の初期生育抑制障害発生に伴う水田土壌中の硫黄含量の変化とその実態，土肥誌71(4)：472-479

安井俊樹・大橋祥範・久野智香子・瀧 勝俊・大竹敏也（2022）土壌中の可給態硫黄と金属元素（Cd, Cu, Pb, Zn）の含量からみた愛知県における水稻硫黄欠乏症の発生リスクの評価，愛知農総試研報54：49-54
米山忠克・堀江秀樹・建部雅子・丹野文雄（1990）植物の根量とリン吸収の関係，土肥誌61(4)：382-385