

土壤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

安井俊樹¹⁾・大橋祥範²⁾・久野智香子²⁾・瀧 勝俊²⁾・大竹敏也²⁾

摘要: 愛知県内の水稻硫黄欠乏症の発生リスクを明らかにするため、県内の水田土壌100地点の可給態硫黄と金属元素の含量を測定した。この結果、(1)難溶性硫化物を形成する金属元素の含量は可給態硫黄の量より少なく、可給態硫黄が水稻に吸収されない不可給化の形態に変化することによる硫黄欠乏の発生リスクが低いこと、(2)水稻の硫黄欠乏は土壌中の可給態硫黄量により評価できる可能性があること、(3)水稻の硫黄欠乏が発生する危険性が高い地域は2%であることが明らかになった。また、硫黄欠乏の危険性が高い地域においても水稻の硫黄欠乏が発生していないことを確認した。今後は愛知県内の土壌中の可給態硫黄含量が低い地域における水稻硫黄欠乏症の発生の有無を注視していく必要がある。

キーワード: 水稻、可給態硫黄、金属元素(Cd、Cu、Pb、Zn)、硫黄欠乏症

Quantitative Analysis of Available Sulfur and Heavy Metals (Cd, Cu, Pb, and Zn) in Paddy Soils in the Aichi Prefecture to Evaluate Sulfur Deficiency Risk in Rice

YASUI Toshiki, OHASHI Yoshinori, KUNO Chikako, TAKI Katsutoshi and OTAKE Toshiya

Abstract: To clarify the risk of sulfur deficiency in rice plants, available sulfur and heavy metals in paddy soil at 100 points in the Aichi Prefecture were quantified. By comparing the measurement results with existing provisional evaluation methods, some areas were found to be at risk of developing rice sulfur deficiency. It has been suggested that there is a latent occurrence of sulfur deficiency in paddy rice in the Aichi Prefecture; therefore, we investigated the paddy fields near areas where the risk of occurrence was considered to be high. We analyzed the growth of paddy rice, the sulfur content in the foliage, and the yield of unpolished rice, and observed no sulfur deficiency. Based on the above results, areas with risk of occurrence of sulfur deficiency in paddy rice were found in Aichi Prefecture based on the provisional evaluation method, but no deficiency was observed in the surveyed areas. In the future, closer attention should be given to the occurrence of paddy rice sulfur deficiency in areas with low available sulfur content in soils of the Aichi Prefecture.

Key Words: Rice Plant, Available Sulfur, Heavy Metals (Cd, Cu, Pb, Zn), Sulfur Deficiency

本研究の一部は「全国農業協同組合連合会の肥料委託試験(2020,2021年)」により実施した。

¹⁾環境基盤研究部(現新城設楽農林水産事務所) ²⁾環境基盤研究部

緒言

水稲の硫黄欠乏による生理障害の発生(以下、硫黄欠乏症)は、2000年に滋賀県で確認され、その後、複数の県から発生確認と対策事例が報告されている¹⁻⁴⁾。水稲の硫黄欠乏症は、初期生育での葉の黄化、分けつや草丈の伸長の抑制といった停滞症状が特徴で、栄養生長期間の短い極早生や早生品種では、初期生育停滞による分けつ、穂数不足により適正な粒数を確保できず、減収する場合がある¹⁾。

硫黄欠乏症の発生要因として、①水稲が吸収可能な可給態硫黄の絶対量不足、②湛水下での土壤還元の進行による不可給化が考えられている¹⁾。硫黄は植物体内でメチオニンやシステインといったアミノ酸合成に必須の元素であるが、硫化水素による水稲の根傷みや登熟期以降急激に生育が衰え収量が低下する「秋落ち」の懸念から、稲作では硫黄を含む肥料を施用しない施肥体系が徹底されてきた。この硫黄を含む肥料の長年の不使用により、水田土壌中の可給態硫黄の量が低下し、水稲の硫黄欠乏発生の一因となっている¹⁾。

愛知県(以下、本県)でも他県と同様に硫黄資材の施用は長年避けられており、水田土壌中の可給態硫黄量の低下による硫黄欠乏症の発生が懸念されている。しかし、本県では水田土壌中の可給態硫黄含量の調査は行われておらず、その実態は不明である。加えて、硫黄欠乏症は、窒素欠乏や一般的な還元障害の症状と酷似していることから目視のみの判別は難しいとされており、正確な発生実態が把握できていないと考えられる¹⁾。

一方、硫黄は水稲の根から硫酸イオンの形で吸収されるが、硫酸イオンは水田の湛水条件下において、土壤還元の進行に伴い金属元素(Cd、Cu、Pb、Zn)との難溶性硫化物の形成により水稲に吸収されない不可給化の形態に変化する²⁾。辻は、滋賀県の水稲にみられた硫黄欠乏症は、可給態硫黄水準の低下と湛水による不可給化の相乗効果により誘発された可能性を指摘している⁴⁾。

そこで、本県における硫黄欠乏症の発生状況と発生リスクを検証するため、県内水田100地点を対象とした土壌中の可給態硫黄量の実態と、可給態硫黄の不可給化に影響を及ぼす金属元素量との関係を調査した。さらに、土壌中の可給態硫黄含量の低い地域において硫黄資材施用による水稲の生育と硫黄吸収量との関係を検討した。

材料及び方法

1 愛知県内水田土壌における可給態硫黄と金属元素(Cd、Cu、Pb、Zn)含量の実態調査

本県における水稲の硫黄欠乏症の発生状況と発生リスクを検証するため、2020年から2021年に土壌の実態調査を行った。

(1) 供試土壌

本県内水田100地点(図1)から採取した土壌を分析に供試した。調査地域の内訳は、尾張地域45地点、西三河地域45地点、東三河地域10地点、土壌の種類の内訳は、黒ボク土2



図1 水田土壌を採取した100地点

地点、黒泥土1地点、灰色低地土34地点、グライ土40地点、グライ台地土1地点、灰色台地土8地点、黄色土14地点であった。

(2) 調査項目及び分析方法

土壌に含まれる可給態硫黄と、硫黄と難溶性硫化物を形成する金属元素(Cd、Cu、Pb、Zn)を調査した。

可給態硫黄の分析は、リン酸二水素カルシウム抽出法に基づき、風乾細土5 gに0.01 Mリン酸二水素カルシウム抽出液に25 mLを加え、2時間の振とうを行う(固液比1:5抽出)。振とう後、遠心分離器(500 rpm、10分間)で固液を分離して、上澄み液を採取し、0.45 μmのフィルタを通過させた試料液中の硫酸イオン濃度イオンクロマトグラフ(SP-10A、島津製作所、東京)により定量した⁵⁾。測定した硫酸イオン濃度を硫黄濃度に変換し、可給態硫黄量とした。

金属元素(Cd、Cu、Pb、Zn)の分析は、塩酸抽出法に基づき、風乾細土10 gに0.1 N 塩酸抽出液50 mLを加え、30°C 恒温で12時間の振とうを行う。振とう後、遠心分離器(2500 rpm、3分間)で固液を分離して、上澄み液を採取し、0.45 μmのフィルタで濾過、超純水で希釈を行い、原子吸光度計(ZA-3300、(株)日立ハイテクサイエンス、東京)により定量した²⁾。

2 可給態硫黄含量が少ない地域における欠乏症の調査

前項の調査で水稲の硫黄欠乏の発生リスクが高いと評価された地域で、硫黄資材施用が水稲生育と硫黄吸収量に与える影響、灌漑水を含む環境からの硫黄供給量が水稲の硫黄吸収量に与える影響を検証した。

(1) 調査地域と硫黄資材の施用区の設定

1の調査で、水田土壌中の可給態硫黄含量が最も少なかった水田を中心に半径約1 kmの範囲にある水田で、2020年と2021年の2年間に、各年3か所ずつ別のは場で、硫黄資材施用の有無による水稲の生育、収量及び硫黄の吸収量の差異から硫黄欠乏の発生を調査・評価した。

硫黄資材は、2020年が硫酸マグネシウム(「硫マグ25」ナイカイ商事株式会社、東京 以下、硫マグと略記)、2021年が硫

酸カルシウム（「畑のカルシウム」南九州化学工業株式会社、宮崎県 以下、石膏と略記）を使用した。調査試験区の概要は表1のとおりである。

(2) 水稻の栽培概要と調査項目

水稻の栽培概要と調査内容は図2のとおりである。

水稻の生育は、草丈、分けつ数及び葉色の推移を、成熟期に稈長、穂長、穂数を調査した。収量は、連続する3条から10株ずつ30株を1区当たり2か所で採取し、この2か所の収量の平均値をその水田の収量とした。

全硫黄は分けつ期に各区3株、2か所で株元から水稻茎葉を採取し、105°Cで48時間乾燥した後、粉碎した茎葉試料を硝酸と過塩素酸により湿式灰化し、ICP発光分光分析装置(iCAP 6500、サーモフィッシャーサイエンティフィック、アメリカ)を用いて定量した。

(3) 土壌中の可給態硫黄と金属元素(Cd、Cu、Pb、Zn)の調査

水稻作付け前の土壌について、可給態硫黄と金属元素の量を測定した。また、2021年は水稻栽培期間中の可給態硫黄の推移を確認するため、中干し期間、収穫前落水時も調査した。

可給態硫黄と金属元素の測定は、1と同様の方法により行った。

(4) 試験ほ場の灌漑水の硫酸イオン濃度の調査

試験ほ場で灌漑水からの硫黄供給量を2020年、2021年の2年間、生育調査と水稻茎葉中硫黄濃度調査時に用水口から灌漑水を採水、硫酸イオン濃度をイオンクロマトグラフ(SPD-10A、島津製作所、東京)により定量した。

結果及び考察

1 愛知県内の水田土壌における可給態硫黄と金属元素含量の実態調査

本県内水田における土壌からの可給態硫黄の供給力の実態調査を実施した。その結果、県内100地点の水田土壌に含まれる可給態硫黄は8.9~125.2 mg S kg⁻¹であり、中央値は27.0 mg S kg⁻¹、平均値は32.3 mg S kg⁻¹であった(図3)。100地点の可給態硫黄含量を物質量に変換すると、0.28~3.91 mmol kg⁻¹であった。

一方、水田土壌に含まれる金属元素(Cd、Cu、Pb、Zn)の物質量合計は0.02~1.11 mmol kg⁻¹であり、中央値は0.18 mmol kg⁻¹で、平均値は0.21 mmol kg⁻¹であった。辻は、滋賀県の水稲にみられた硫黄欠乏は可給態硫黄水準の低下と湛水による不可給化の相乗効果により誘発された可能性を指摘している⁴⁾。このため、水田土壌からの硫黄供給力を評価するため、土壌から供給される可給態硫黄として硫酸イオンの量と難溶性硫化物の形成量に影響を及ぼす金属元素(Cd、Cu、Pb、Zn)の量の関係を確認した。図4には可給態硫黄の物質量から金属元素(Cd、Cu、Pb、Zn)の物質量を差し引いた量を示した。調査地点すべてにおいて金属元素の物質合計量は可給態硫黄の物質量より少なかった。また、可給態硫黄の物質量と可給態硫黄から金属元素を差し引いた物質量の差との間には正の相関が認められた(図5)。

なお、今回調査したすべての水田において、目視調査による水稻の硫黄欠乏症は確認されなかった。

菅野は、「難溶性硫化物形成を考慮した水田土壌の硫黄肥沃度評価」の暫定評価法として、(1)土壌の可用性Zn、Pb、Cuなど物質量合計が可給態硫黄の物質量を大幅に上

表1 硫黄を含む資材の施用試験の概要

試験年度 (施用資材)	供試品種	硫黄を含む資材の施用試験の概要			試験ほ場	
		施用量 (kg 10 ³ m ⁻²)	硫黄投入量 (kg 10 ³ m ⁻²)	ほ場数 ²⁾	処理区 面積 (a)	可給態硫黄含量 (mg S kg ⁻¹)
2020年(硫マグ)	コシヒカリ	20	5.0	3	10~12	8.9~13.1
2021年(石膏)	コシヒカリ	40	6.8	3	12.5	13.4~15.5

z) 各ほ場に硫黄を含む資材を施用した処理区と無処理区を設けた

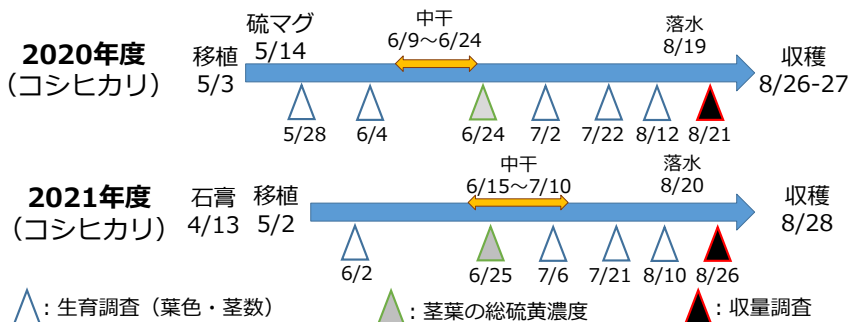


図2 硫黄を含む資材の施用試験概要

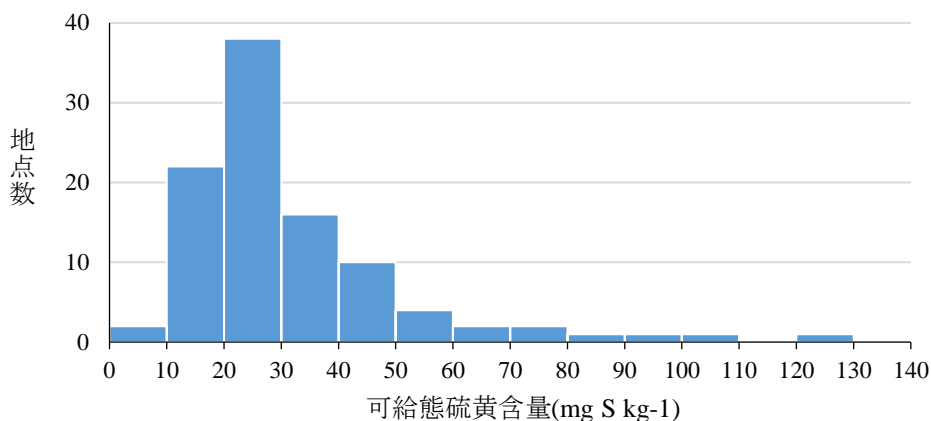


図3 県内100地点の水田土壌における可給態硫黄含量

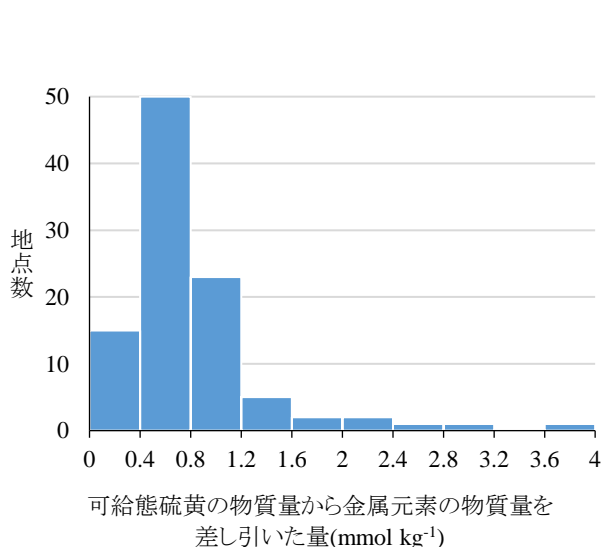


図4 県内100地点の水田土壌における可給態硫黄と金属元素の物質質量の差

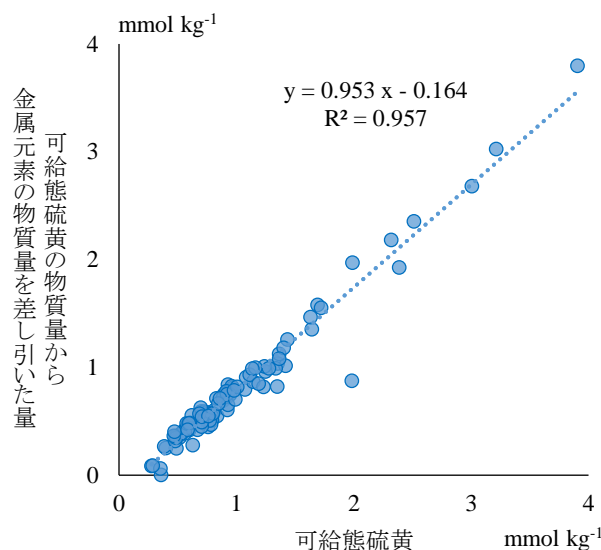


図5 可給態硫黄から金属元素を差し引いた値と可給態硫黄含量との関係

回る場合は硫黄欠乏に注意する、(2)それ以外の場合でも可給態硫黄が一定水準以下の場合には硫黄欠乏に注意する、(3)上記以外の場合には硫黄欠乏の心配はないとしている^{1,6)}。

また、可給態硫黄の限界水準については、難溶性硫化物形成を考慮する必要がなければ、Dobermann and Fairhurstによる基準 (9 mg S kg⁻¹未満)⁷⁾が適当、可給態硫黄が10~20 mg S kg⁻¹の領域では条件により注意が必要である、としている^{1,6)}。広島県の調査では、この暫定評価法を基に、水田土壌中の可給態硫黄が10 mg S kg⁻¹未満を危険域、10以上20未満mg S kg⁻¹をグレーゾーン、20mg S kg⁻¹以上を安全域に分類し、10以上20 mg S kg⁻¹未満での硫黄欠乏は金属元素の物質質量が可給態硫黄の物質質量を上回っていることが原因の可能性であることを指摘している¹⁾。今回の調査から、本県では金属元素の物質合計量は可給態硫黄の物質質量より少なく、可給態硫黄の物質質量と可給態硫黄から金属元素を差し引いた物質質量の差との間には正の相関が認められた。よって、難溶性硫化物を形成する金属元素の含量を考慮する必要がなく、可給態硫黄含量の多寡を評価することで、水稲の硫黄欠乏の発生リスクを評価できると判断された。

そこで今回の結果を、菅野の暫定評価法、広島県の評価

分類に基づき評価すると、水稲の硫黄欠乏症が発生する危険性が高い可給態硫黄10 mg S kg⁻¹未満の地域は2%、10 mg S kg⁻¹以上20 mg S kg⁻¹未満の発生可能性がある地域は22%であり、早急に、硫黄欠乏が発生する危険性が高い地域は少ないと判断された。

2 可給態硫黄含量が少ない地域における欠乏症の調査

(1) 硫黄資材施用が水稲生育と硫黄吸収量に与える影響

水稲の硫黄欠乏症は、窒素欠乏や一般的な還元障害の症状と酷似していることから目視のみの判別は難しい。このため、水稲の硫黄欠乏の診断方法として、(1)硫黄欠乏による生育障害が発現する分げつ期の水稲内の総硫黄濃度から診断、(2)硫黄資材施用による生育、収量及び水稲内の総硫黄濃度の改善効果による診断がある。

そこで、前項の土壌調査で可給態硫黄10mg S kg⁻¹未満の硫黄欠乏症の発生リスクが高いと評価された地域において、硫黄資材施用による水稲の生育と硫黄吸収量との関係を検証し、本県における水稲の硫黄欠乏の発生状況をさらに検討した。

試験ほ場の栽培前の土壤中の可給態硫黄量は、2020年は8.9~13.1 mg S kg⁻¹、2021年は13.4~15.5 mg S kg⁻¹であり、土壤中の可給態硫黄量から硫黄欠乏の発生を評価すると発生の危険性が高いから発生の可能性があるほ場と分類された。可給態硫黄を物質質量に換算すると、0.28~0.48 mmol kg⁻¹であり、金属元素 (Cd、Cu、Pb、Zn) の含量の物質質量は、0.18~0.22 mmol kg⁻¹であった。可給態硫黄と金属元素の物質質量の差から、試験ほ場は難溶性硫化物形成による水稻の硫黄欠乏の発生リスクが低いほ場であった。

硫黄資材の種類ならびに資材施用の有無の違いによる分けつ期における水稻の茎葉中の総硫黄濃度を表2に示した。分けつ期の総硫黄濃度は、硫黄資材の無施用の場合、2020年0.18%、2021年0.16%であった。一方、硫黄資材を施用した場合、硫マグを施用した2020年は0.18%、石膏を施用した2021年は0.16%であり、硫黄資材の種類ならびに資材施用の有無の違いによる水稻の硫黄吸収量に差は認められなかった。また、水稻の生育(草丈、茎数、葉色)、収量構成要素(穂長、穂数、千粒重)および収量についても差が認められず(図6、表3)、生育初期の目視調査において水稻の硫黄欠乏の症状は確認されなかった。

2021年硫黄資材施用の有無による水稻の栽培期間中の土壤中の可給態硫黄量の差を調査した結果、石膏の施用により1.1~1.8倍程度高く推移しており、施用した硫黄資材は土壌に残留した状態であると推察された(表4)。

辻は、硫黄欠乏による生理障害は分けつ期に発現し、茎葉中の総硫黄濃度が0.13%にまで減少したこと、回帰式から相対収量が0.50~0.55の時の総硫黄濃度は0.12~0.13%であって、水稻茎葉の硫黄欠乏限界値は0.12%と推定されたことを報告している⁴⁾。一方、硫黄資材の施用により、水稻の硫黄吸収量が改善されることが報告されている。

このことから、今回の試験で硫黄資材無施用区において、分けつ期の茎葉中総硫黄濃度が2020年で0.18%、2021年で0.16%と0.13%よりも多く、その含量が硫黄資材の施用によっても増加しないことから、水稻の硫黄要求量を満たし、硫黄欠乏は発生していないと考えられた。

(2) 環境からの硫黄供給量が水稻の硫黄吸収量に与える影響

試験水田における硫黄の収支(水稻の硫黄吸収量と土壌、灌漑水からの硫黄供給量との関係)から水稻の硫黄欠乏の発生リスクを検証した。

今回の調査から、水稻植物体の硫黄吸収量は、作物体中の総硫黄濃度と作物重から1.0 kg 10 a⁻¹程度と算出された。一方、土壌からの硫黄供給量は、水稻の硫黄欠乏の発生リスクが高くなる土壤中の可給態硫黄が10 mg S kg⁻¹の場合、1.0 kg 10 a⁻¹となり、水稻の利用率、金属元素との結合、ほ場からの流亡などを考慮すると、水稻の硫黄吸収量を十分に賄えないと推察された。

次に、生育期間中に複数回採水した灌漑水中の硫酸イオン濃度の平均値は、2020年度3.5 ppm、2021年度2.5 ppmであり、水稻栽培期間中に10 a当たり1500 tの灌漑水が利用されているとした場合⁸⁾、灌漑水からの硫黄供給量は、2020年度1.8 kg 10 a⁻¹、2021年度1.3 kg 10 a⁻¹と算出された。

そこで、土壌と灌漑水の供給量を慣行施肥によって供給

表2 分けつ期における茎葉の総硫黄濃度

栽培年度	処理区	試料採取日	総硫黄濃度 ^{z)} (%)
2020	無施用区	6月24日	0.18 ± 0.02
	硫マグ区		0.18 ± 0.00
2021	無施用区	6月25日	0.18 ± 0.01
	石膏区		0.18 ± 0.01

z) 平均値±標準偏差

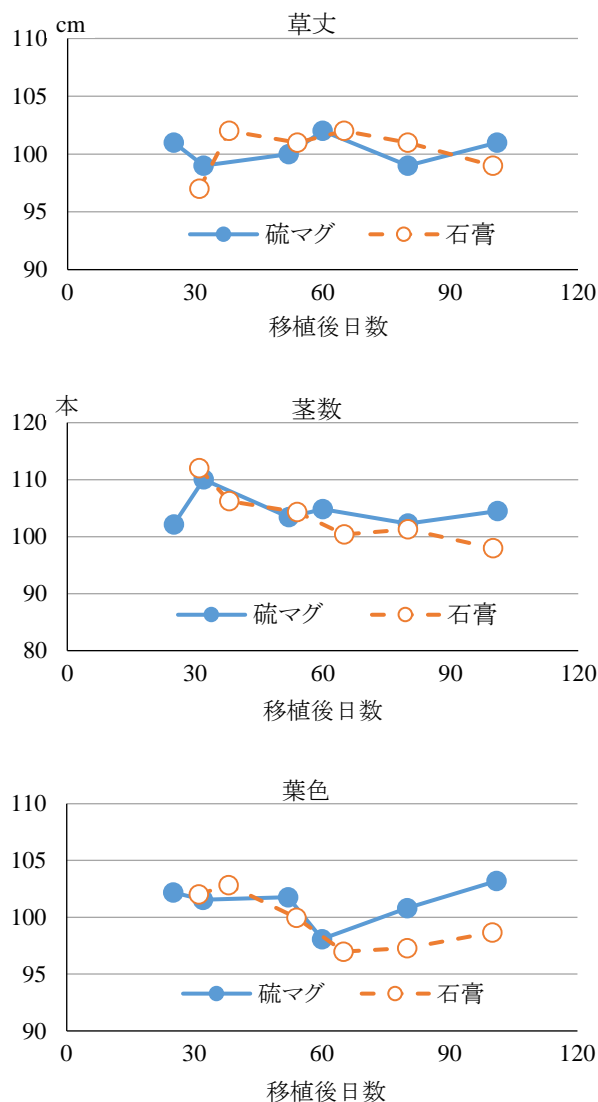


図6 硫黄資材の施用が水稻の生育に及ぼす影響 (縦軸は無施用区を100とした相対値)

される硫黄の量は、0.2 kg 10 a⁻¹を合わせた「投入量」と水稻硫黄吸収量との関係を図7に示した。2年とも施肥を含む「投入量」は水稻の硫黄吸収量の1.0 kg 10 a⁻¹を上回っており、水稻の利用率を考慮する必要があるが、試験水田において硫黄欠乏が発生しなかった要因と考えられた。また、「投入量」が吸収量を上回っていたことが、土壌中の可給態硫黄含量が収穫前落水時で増加した要因と考えられた。

表3 各年度の収量構成要素

試験年度	処理区	稈長 (cm)	穂長 (cm)	穂数 (本 m ⁻²)	千粒重 (g)	わら重 (g m ⁻²)	精粃重 (g m ⁻²)	精玄米重 (g m ⁻²)
2020	無施用区	86.0	18.9	342	22.7	694	685	541
	硫マグ区	86.5	18.9	344	22.6	732	708	551
2021	無施用区	85.8	19.8	330	22.3	725	696	552
	石膏区	85.9	19.3	328	22.2	705	683	542

表4 土壌中の可給態硫黄含量の推移

処理区	作付け前 (mg S kg ⁻¹)	中干し期間 (mg S kg ⁻¹)	収穫前落水時 (mg S kg ⁻¹)
無施用区	15.6	12.7	17.3
石膏区		23.3	26.3
無施用区	14.9	13.8	20.2
石膏区		15.3	22.0
無施用区	13.4	11.3	14.7
石膏区		15.0	23.1

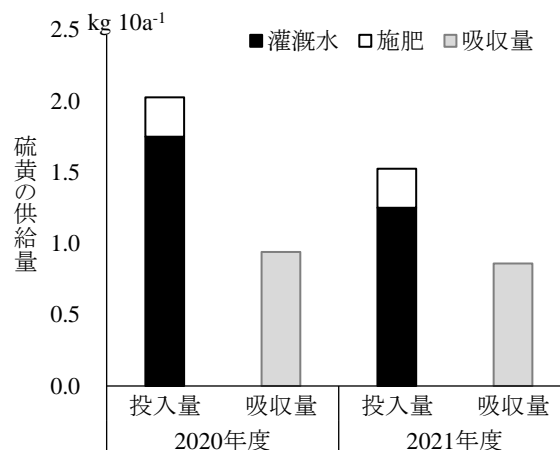


図7 調査地域における水稻の硫黄収支

水稻の硫黄欠乏は、土壌中の可給態硫黄量に加え、難溶性硫化物を形成する金属元素とのバランスにより発生することが明らかにされている。しかし、硫黄欠乏発生の危険性が高い地域においても、硫黄欠乏が発生するほ場と発生しないほ場があるため、その発生メカニズムについて十分に解明されているとは言えない。

今後、硫黄資材の施用に当たり、水田における硫黄の動態と収支調査に加え、水稻の硫黄欠乏の発生メカニズムをさらに解明することにより、水田土壌における硫黄の土壌診断基準を策定する必要があると考える。

また、広島県では2016年に水稻の硫黄欠乏の発生を確認した後、発生面積は年々増加傾向にあり、点在確認されていた被害発生ほ場を中心とし被害面積が拡大している。そのため、点在する被害ほ場の早期把握は被害面積の拡大防止を図るうえで極めて重要であると指摘している¹⁾。今回の調査では、本県においては水稻の硫黄欠乏症は確認されなかったが、今後も発生を注視し、発生が確認されたら早期の対策を講じる必要がある。

謝辞: 水田土壌100地点の可給態硫黄の分析、水稻茎葉の採取及び坪刈収量の調査には愛知県経済農業協同組合連合会の池田彰弘氏と古戸怜奈氏に、水稻茎葉の全硫黄の分析にはあいち産業科学技術総合センターの山田圭二氏と齋藤恵氏にご協力いただいた。ここに記して謝意を表す。

引用文献

1. 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> (2021.5.11参照)
2. 菅野均志. 水田土壌の硫黄(S)肥沃度評価に関する一考察. 肥料科学. 第41号, 29~49(2019)
3. 小野寺和英, 島秀之, 長谷川榮一. カドミウム汚染圃場における水稻生育停滞の回避技術. 宮城県古川農業試験場報告9. 7-12(2011)
4. 辻藤吾. 水稻の硫黄欠乏による栄養障害と硫黄吸収特性. 日本土壌肥料学雑誌. 71, 464-471(2000)
5. 可給態硫黄(リン酸二水素カルシウム抽出法). https://www.agri.tohoku.ac.jp/soil/jpn/images/soil_avail-sulfur.pdf (2021.5.11参照)
6. 水稻におけるイオウ欠乏の現状と対策. <http://jssspn.jp/info/file/%E8%AC%9B%E6%BC%94%E8%A6%81%E6%97%A8%EF%BC%8D%E8%8F%85%E9%87%8E.pdf> (2021.5.11参照)
7. Dobermann and Fairhurst. Rice: Nutrient Disorders and Nutrient Management. Handbook Series International Rice Research Institute Los Banos, 191(2000)
8. 堀江武. 作物栽培の基礎. 農山漁村文化協会. P78 (2005)