

# 広島県における水稻硫黄欠乏の発生状況と対策

広島県西部農業技術指導所 農業革新支援担当（作物）

## 1 はじめに

水稻の硫黄欠乏は、2000年に元滋賀県農業試験場の辻氏によって報告されている生理障害（栄養障害）である。硫黄は作物の生育に欠かすことのできない必須元素のひとつであるが、日本は火山国で元来、硫黄欠乏の発生リスクは少ないと考えられてきたことや、水稻では“秋落ち”への懸念から硫酸根を含む肥料の施用を控える指導が長年にわたって徹底されてきた。そのため、水稻栽培における硫黄の重要性は余り問題視されることは少なく、むしろ生産現場では根腐れを引き起こす硫化水素の発生を助長する“厄介者”として捉えられてきた経緯がある。

広島県では数年前から県中部地帯を中心に田植え後の稲が黄化、分けつの発生や草丈の伸長が抑制されるといった初期生育停滞症状が点在確認されるようになり、調査を進めていく中で硫黄欠乏が原因であることが判明し、関係機関と連携して対応策を検討してきた。今回は、広島県における硫黄欠乏発生確認に至る経緯や発生状況、対策実施に係るこの間の取組について紹介する。

## 2 硫黄欠乏の被害様相と発生機構について

### (1) 被害様相

広島県における水稻硫黄欠乏の発生状況とその対策について触れる前に、簡単に硫黄欠乏の被害様相と想定される発生機構等について触れておきたい。

水稻の硫黄欠乏では一般的に次のような症状が確認されるが、一見、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での判別は難しい（写真1）。

- ①田植え後30日頃から葉が黄化し、分けつの発生が抑制される（写真2）。
- ②6月末頃から（5月上旬田植えの場合）症状が回復し始め、急激に葉色が濃くなる。
- ③生育中期（6月末～7月）の窒素吸収過多によって軟弱生育となり、倒伏リスクが高まる（写真3）とともに、病害抵抗性の低下により穂いもちが発生しやすくなる。
- ④成熟期になっても茎葉が黄化しない（青みが残る）場合が多く、玄米のタンパク含量が高くなる傾向がある。
- ⑤栄養成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・穂数不足によって適正な収量が確保できず、減収する場合がある。



写真1 軽度の症状（下葉黄） 写真2 重度の初期生育停滞症状（葉の黄化）写真3 生育中期以降の窒素吸収過多による倒伏

## (2) 発生機構

硫黄はタンパク合成に係る必須元素で、水稻は硫黄(S)を硫酸イオン(SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>)の形で吸収する。硫黄欠乏発生要因として、①水稻が吸収可能な可給態硫黄(硫酸態S)の絶対量不足と②湛水下での土壤還元による不可給化(水稻が吸収できない形態に硫黄が変化)が考えられる(図1)。

易分解性の有機物を多く含むペースト肥料利用時に硫黄欠乏が発生しやすいのは、肥料自体に硫酸根が含まれていないことに加え、イネの根部付近で急激な還元が進行することによる硫黄の不可給化によるものと考えられている。

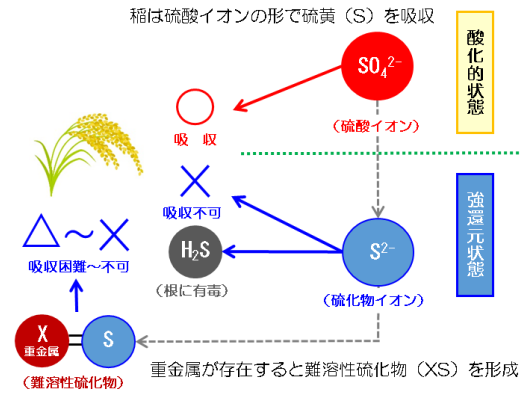


図1 水稻硫黄欠乏の発生機構(イメージ図)

## 3 広島県における水稻硫黄欠乏の発生状況

### (1) 発生確認の経緯

広島県として初めて水稻硫黄欠乏の発生を確認したのは2016年である。水稻の単収低迷に悩む集落法人の収量改善活動に関わる中で、当該法人の水稻の生育が近隣法人に比べ極端に初期生育が劣っている(葉の黄化、分げつ抑制)ことに着目した。初期生育停滞を誘発する各種要因・項目を洗い出す中で、当該法人がペースト肥料を利用していたことから硫黄欠乏の可能性を選択肢に列挙した。この検証に当たっては、硫黄欠乏回避対策として2011年に宮城県古川農農業試験場の小野寺氏らによって報告されている“育苗培土への石膏混和処理”を検証方法として選択し、2016年産コシヒカリ作付圃場において8条の田植え機の片側4条に育苗床土石膏混和処理苗(以下「床土石膏苗」という)を、また、残り4条に慣行苗を積載し田植えを実施した。この結果、床土石膏苗区では大幅に初期生育が改善され、m<sup>2</sup>当たり穂数の増加によって1割の収量改善が図られた(図2、3、写真4、表1)。この検証結果から、当該法人で問題となっていた水稻の初期生育停滞は硫黄欠乏が主因である可能性が高いことが示唆された。

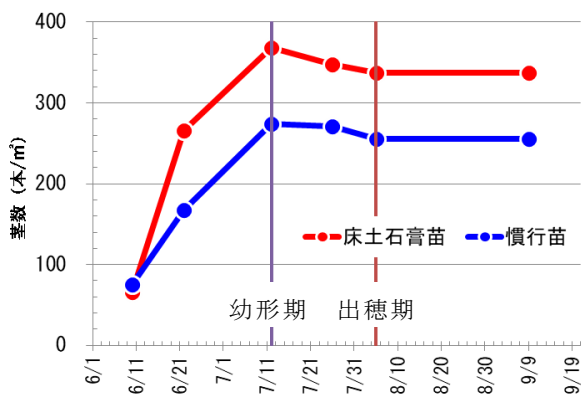


図2 各処理区のm<sup>2</sup>茎数の推移(2016年)

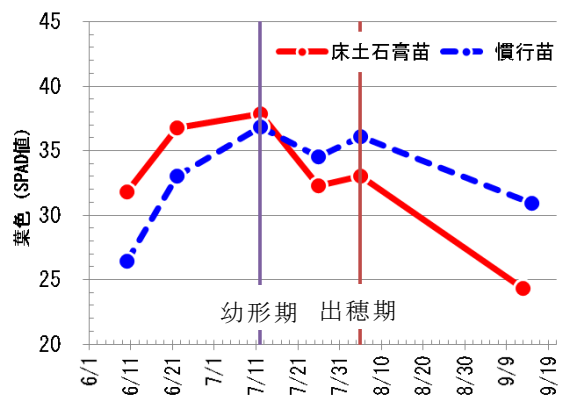


図3 各処理区の葉色(SPAD)の推移(2016年)



写真4 水稲硫黄欠乏検証試験圃場におけるコシヒカリの生育状況（2016年）  
 左：幼穂形成期における床土石膏苗（左）と慣行苗（右）の生育差  
 中：成熟期に圃場内に形成された8条毎の葉色濃淡の列  
 右：成熟期における床土石膏苗（右2条）と慣行苗（左2条）移植区の熟れ色差異

表1 水稲硫黄欠乏検証試験圃場における収量及び玄米品質等（2016年）

区分	収 量		食味値	食味分析		穀粒品質 整粒歩合 (粒数%)
	精玄米重 (kg/10a)	屑米重 (kg/10a)		アミロース (%)	タンパク含量 (DB%)	
慣行苗	490 (100)	19	78	20.2	7.3	78.7
床土石膏苗	537 (110)	18	82	20.1	6.8	78.2

注1：収量は各区3㎡×2か所刈取調査の平均値で水分15%換算値。調製は1.85mmの網目の篩を用いた。  
 注2：食味分析は静岡製機製の食味分析計(TM-3500)による玄米分析値でタンパク含量はDB(ドライベース)値。  
 注3：穀粒品質は㈱サタケの穀粒判別器(RGQI10B)による分析値。

床土石膏苗移植で生育が大きく改善された稲の分けつ盛期における稲体中の硫黄含量は慣行苗に比べ多く、初期生育停滞が硫黄欠乏によって誘発されている可能性が裏付けられた（写真5、表2）。

2017年には、粒状一発肥料利用圃場においても初期生育停滞圃場が確認され、硫黄を含む含硫資材施用によって劇的に生育が回復することから硫黄欠乏による障害であると考えられ、水稲硫黄欠乏はペースト肥料利用に限らず、県内に点在している可能性が示唆された。



写真5 床土石膏苗と慣行苗の移植株  
 2018年産コシヒカリ（6/25）

表2 稲体（乾物中）の硫黄含量（2018）

区分	稲体S含量 (g/kg)
床土石膏苗	2.60
慣行苗	1.67

注：秋田県立大学に分析依頼

## （2）発生状況

2017年にペースト肥料利用圃場以外でも硫黄欠乏症状が確認されたことを受け、2018年に東北大学の協力を得て県中北部地域を中心としたモニタリング調査を実施した。

モニタリング調査は、①分けつ期の稲株元への含硫資材埋込処理による生育応答有無の観察（写真6）と②収穫後の土壌中の可給態硫黄（硫酸態S）の分析の2通りの手法で発生の実態把握と発生リスクの評価を行った。

60圃場でのモニタリング調査の結果、22圃場で含硫資材施用による生育応答が確認（硫黄欠乏発生）されるとともに、水稲硫黄欠乏の発生リスクが高いとされる土壌中の可給態硫黄含量が10mg/kg未満の圃場が38圃場（調査圃場の64%に相当）確認された。一方で、

可給態硫黄が少ないにも関わらず、含硫資材施用に対する生育応答が見られない圃場や、これとは反対に比較的可給態硫黄が多いにも関わらず含硫資材施用に対する生育応答が確認された圃場もあった（図4、5）。なお、後者については、東北大学による土壤中の重金属分析によって「可給態硫黄の物質量を上回る重金属の存在下での難溶性硫化物の形成によって硫黄欠乏が誘発」されている可能性が高いことが分かっている（図6）。

モニタリング調査によって、①水稲硫黄欠乏はペースト肥料に限った生理障害ではないこと、②県中北部地帯の水田土壌における可給態硫黄含量は低水準であり、水稲硫黄欠乏の発生リスクが高いことが分かった。



写真6 含硫資材埋込による生育応答の検証  
※白線部の株元に含硫資材を埋込処理

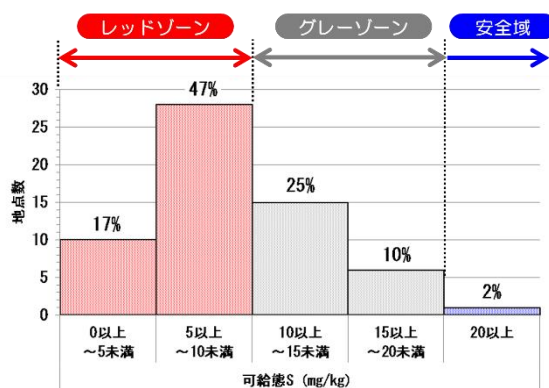


図4 モニタリング圃場における可給態S分布状況  
※Ca(H<sub>2</sub>PO<sub>4</sub>)<sub>2</sub>抽出によるイオンクロマト分析  
(東北大による分析データを基に作図)

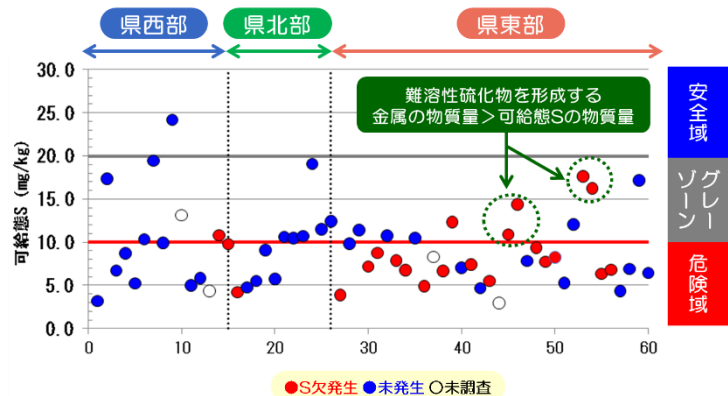


図5 モニタリング圃場における可給態S含量とS欠発生有無の関係  
※含硫資材施用による生育応答あり：S欠発生，生育応答なし：未発生

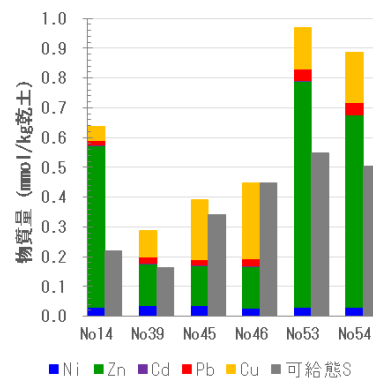


図6 可給態Sと重金属の物質量の関係  
※可給態S>10mg/kgにも関わらず生育応答が見られたサンプル

本県における硫黄欠乏発生面積は年々増加傾向にあり、数年前に点在確認されていた被害発生圃場を中心として被害面積が拡大するとともに、既発生圃場においては被害程度が年々大きくなる傾向にある。実際に2017年に点在確認された硫黄欠乏圃場が2021年には当該圃場を中心に半径1km圏内に生産者の別に関わらず大半の圃場で硫黄欠乏症状が確認されるようになっている地域もある。このように硫黄欠乏圃場の点在化は、数年後の散在化を暗示しているとも考えられ、点在する被害圃場の早期把握は被害面積の拡大防止を図る上で極めて重要であると考えられる。

#### 4 水稻硫黄欠乏に係る対策

県では硫黄欠乏の予防対策及び事後対策について他県での試験事例等を基に各対策の効果を現地検証し、現在、予防対策として「育苗培土への石膏混和」あるいは「移植前の苗箱への石膏施用」を、また事後対策として「含硫資材の本田施用」を薦めている（表3）。

問題発生圃場では、床土石膏混和や移植前の育苗箱石膏施用等の対策によって大幅な初期生育改善効果が得られている一方で、初期生育が旺盛になった反動で生育中後期に凋落を招き、硫黄欠乏対策が収量改善に結びつかない事例も見受けられている。収量改善に当たっては、施肥設計の見直しとセットで対策を講ずる必要がある。これら生育中後期の凋落を回避するため、硫黄欠乏対策と併せ、幼穂形成期の窒素供給補完を目的として、移植前に被覆尿素肥料のLPS80を苗箱施用することで収量改善を実現している経営体もある。

地域的な取組としては、育苗培土製造メーカーと連携して硫黄欠乏の発生リスクの高いペースト肥料利用経営体に対し、石膏を混和した硫黄欠乏対策専用培土を受注販売しているJAもある。また、JA全農ひろしまでは、本県における水稻硫黄欠乏の発生リスクが大きい状況にあることを踏まえ、令和元年から被覆尿素一発肥料中に一定の硫黄が含まれるよう配合の見直しが行われている。

なお、硫黄欠乏に係る情報周知に当たっては、県の水稻・麦・大豆栽培基準（<https://www.pref.hiroshima.lg.jp/soshiki/82/kijun.html>）にも情報掲載し周知に努めている。

表3 水稻硫黄欠乏に係る予防対策と事後対策

区分	対策	メリット	デメリット
予防対策	①育苗床土への石膏混和 (100g/箱)	省力的で低コスト	苗のマット強度が低下しやすい
	②移植前苗箱への石膏施用 (250g/箱)	低コスト	育苗箱に石膏が固着し汚れが落ちにくい
	③代掻き前の本田石膏施用 (100kg/10a)		高コストかつ効果持続性に乏しい (効果持続期間1~2年程度)
事後対策	④落水管理	特段の費用を要さない	効果発現が遅効的で穂数不足を招く場合がある
	⑤含硫資材の本田施用 (10kg/10a)	障害発生後の対策のためムダがない	散布作業負担が大きい

注：①、②の対策には硫酸カルシウムを、また⑤の対策については水溶解度の高い硫酸マグネシウムを使用する。また、②の対策実施については細粒の硫酸カルシウム資材を用いる。

#### 5 硫黄欠乏の発生を助長すると考えられる要因

硫黄欠乏の発生が助長される要因について、水田における硫黄収支と硫黄の形態変化（不可給化）の2つの視点から考えられる要因を表4にまとめた。

2020年に東北大学の協力を得て実施した県中北部を中心とした25圃場の灌漑水中の硫酸イオン濃度は低水準であり（図7）、本県中部を中心とした硫黄欠乏の点在発生は、灌漑水由来の硫黄供給量が少ないことに加え、これらの地域は硫黄が流亡しやすい花崗岩を母岩とした土壤地帯であること（図8）などが発生を助長しているものと推察された。

表 4 水稻硫黄欠乏の発生を助長すると考えられる要因

区 分	想定される助長要因	
I 供給量 (インプット)	①被覆尿素一発肥料 (S含量少) の普及 (施肥由来による硫黄供給量の減少)	水田土壤中の 可給態硫黄の減少 (絶対量不足)
	②環境対策の進展による大気中の硫酸化物の減少 (天然由来の供給量の減少)	
	③灌漑水中の硫酸イオン濃度が低い (灌漑水由来の供給量が少ない)	
II 流 亡 (アウトプット)	①硫酸イオンが流亡しやすい土質 (花崗岩を母岩とする土壤等)	
III 吸収阻害	①強還元による硫黄の不可給化 ( $\text{SO}_4^{2-} \rightarrow \text{S}^{2-}$ )	硫黄の不可給化 (硫黄の形態変化)
	②重金属との結合による難溶性硫化物形成による硫黄の不動化 (イネが吸収できない形態に変化)	

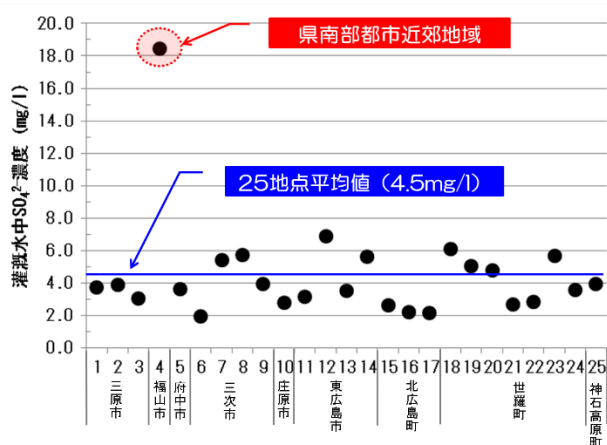


図 7 水稻灌漑水中の硫酸イオン濃度の分布状況  
 東北大による分析データを基に作図 (外れ値を除く地点平均値)

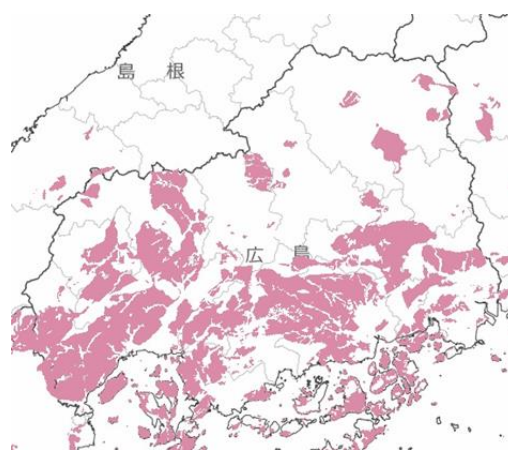


図 8 花崗岩を母岩とする土壤分布状況  
 20 万分の 1 日本シームレス地質図 V2  
 (GSJ, AIST, <https://gbank.gsj.jp/seamless/>) を利用し作図

## 6 おわりに

辻氏によるペースト利用圃場での水稻硫黄欠乏の発生報告から既に 20 年以上もの歳月が経過しているものの、生産現場における本障害の認知度はあまり高くない。本障害の被害様相が窒素欠乏や赤枯れ、一般的な還元障害と酷似していることから、硫黄欠乏であるとの診断や診断を踏まえた適切な対策が行われるケースは稀で、この結果、知らず知らずの内に減収が引き起こされている事例も少なくない。

「過ぎたるは猶及ばざるが如し」で、長年、我が国の稲作において脈々と受け継がれてきた硫酸根を含む肥料を過度に敬遠する“行き過ぎた施肥指導”に警鐘を鳴らすとともに、改めて必須元素としての硫黄施肥の在り方を再考するときに来ているのではないかと思う。

硫黄欠乏によって生産者が知らず知らずのうちに減収被害を被ることがないように、水稻の初期生育停滞を招く生理障害(栄養障害)の一つに硫黄欠乏があることの認知度向上と生産現場への一層の周知が求められる。水稻硫黄欠乏に係る研究の更なる加速化によって、より簡便な発生リスク評価法の確立や、硫黄収支を踏まえた施肥基準(施肥由来の S 所要供給量)の明示が期待される。

最後に、本県の硫黄欠乏発生モニタリング調査にあたり多大な協力を頂いた東北大学の菅野均志准教授、九州大学の藤林恵助教、秋田県立大学の早川敦准教授にこの場を借りてお礼申し上げます。