

令和 2 年 6 月 22 日現在

機関番号：11301

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2017～2019

課題番号：17K07694

研究課題名(和文) 水田土壌の硫黄肥沃度ダイナミクスの実態評価とその制御機構の解明

研究課題名(英文) Sulfur fertility dynamics in paddy soil and its control mechanism

研究代表者

菅野 均志 (Kanno, Hitoshi)

東北大学・農学研究科・准教授

研究者番号：30250731

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,600,000円

研究成果の概要(和文)：水稻の硫黄(S)欠乏に関わる土壌要因を明らかにする目的で、水田土壌のS肥沃度ダイナミクスとその制御機構を検討した。3年間を通じて実施した17供試土壌を用いたポット栽培試験およびそれ以前の試験結果により、土壌の可給態Sの多寡および土壌還元に伴う難溶性硫化物(不溶性S)形成の量的関係により水稻のS欠乏を説明する作業仮説が強く支持されたことから、溶解度の異なる金属硫化物形成が水田土壌の供給力を制御するモデルを提案した。また、岩手県および広島県を対象とした水田土壌のS肥沃度広域評価の結果は、S不足による水稻の生育抑制が特殊ではないことおよび土壌診断に基づく対策が必要であることを示唆するものであった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

近年、各地で水稻の硫黄(S)欠乏が報告されているが、S供給力に関する土壌分析は殆ど行われていないのが実態である。今回提案した土壌S供給力の制御モデルを用いることにより、水田土壌のS肥沃度を精度良く評価することが可能となった(学術的意義)。また、岩手県と広島県を対象に行った可給態Sの広域評価及び定点調査試験を用いた検討結果は、水田におけるS肥沃度管理の不備について問題提起するものであり、社会的意義は大きいと確信する。

研究成果の概要(英文)：In order to determine the soil factors related to sulfur (S) deficiency in paddy rice, S fertility dynamics of paddy soil and its control mechanism were investigated. According to the pot experiments using 17 paddy soils conducted for 3 years and the previous results, it was suggested that the quantitative relationship between the available S in soil and the possible formation of insoluble sulfide produced by soil reduction control the S fertility of paddy soil. Consequently, we proposed the model in which metal sulfides formation with different solubilities regulate the S supply capacity of paddy soil. The results of a wide-area evaluation of soil available S in Iwate and Hiroshima prefectures suggest that the growth suppression of paddy rice due to S deficiency is not special and that measures based on soil diagnosis are necessary.

研究分野：土壌肥料学

キーワード：水田土壌の硫黄肥沃度 可給態硫黄 可溶性金属 難溶性硫化物

## 1. 研究開始当初の背景

硫黄 (S) は植物の必須元素の一つであり、根から硫酸イオンの形態で吸収され、体内でメチオニンやシステイン等の含硫アミノ酸やその他の有機化合物に取り込まれ、ペプチドやタンパク質等の構成成分となる。植物はリンに匹敵する量の S を必要とする一方、わが国では灌漑水や降雨から S の天然供給が豊富であると考えられてきた。また、S は硫安等の窒素肥料の副成分としても農地に入ること多かつたことから、S を養分として考える意識が希薄であった。加えて、水稲作では硫化水素の発生による害 (根腐れ) が警告され、水田への無硫酸根肥料 (硫酸イオンを含まない化学肥料の総称) の施用が長い間推奨されてきた。

このような背景から日本では作物の S 欠乏に特段の注意は払われてこなかったが、近年、わが国の水田で水稲の S 欠乏と S 資材の投入による改善事例が、滋賀県、宮城県、秋田県、岡山県などで報告されている。典型的な S 欠乏土壌では、水稲は分げつ期の茎数増加が鈍化し、茎葉部全体が黄化する症状が観察される。この症状は窒素欠乏に酷似するが、窒素肥料を施用しても症状は改善せず、石膏や硫酸マグネシウム等の S 資材の施用で生育が回復することにより判別可能である。しかしながら、水稲の S 欠乏による生育抑制や収量低下が懸念される圃場がどの程度存在するのか、土壌診断により水田土壌の S 肥沃度評価が可能なのか、また、どのような S 欠乏対策が効果的か等については不明な点が多いのが現状である。

水稲の S 欠乏、すなわち水田土壌の S 肥沃度不足は、湛水に伴う土壌還元の進行により、土壌中の硫酸イオンが硫化物イオンに形態変化し、難溶性の金属硫化物を形成することにより S 可給性が変化することと密接に関連すると考えられるが、水田土壌におけるこのような「S 肥沃度ダイナミクス」は、従来の可給態 S 測定法だけでは評価できず、S 肥沃度変化のメカニズムや S 欠乏土壌の実態等については殆ど検討されてこなかった。

## 2. 研究の目的

本研究では、水田土壌の S 肥沃度ダイナミクスの実態評価とその制御機構の解明を通じて、水稲の S 欠乏対策に不可欠となる「水田土壌の S 肥沃度評価法」を提案することを目的とした。具体的には、1) 各種水田土壌を用いたポット栽培試験により水稲の S 欠乏 (潜在的なものも含む) の実態を検討し、2) 栽培試験結果 (水田土壌の S 肥沃度) を説明し得る土壌化学的メカニズムと土壌診断法を提案し、さらに、3) 土壌診断を用いた広域評価により水田土壌の S 肥沃度を明らかにし、対策の必要性を問題提起した。

## 3. 研究の方法

土壌の可給態 S の診断値は土壌 S 供給力の重要な指標の一つであるが、他方、水稲の硫酸根を含む資材 (S 資材) への生育応答も土壌 S 供給力の指標となる。本研究では、東北大学のキャンパス内圃場で水稲の常時湛水ポット栽培試験を行い、分げつ期に S 資材として試薬の石膏粉末 ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ) を表面施与した処理区および対照区を設定し、出穂期まで水稲の石膏施与への生育応答を観察し、相対乾物重 (対照区/処理区) を目安として S 欠乏の程度を (潜在的なものを含めて) 評価することを基本的な手段とした。また、土壌の可給態 S は、辻 (2000) が提案した方法に準じて 0.01M リン酸二水素カルシウム液の固液比 1:5 抽出液中の硫酸イオン濃度をイオンクロマトグラフにより定量し、乾土 1 キログラムあたりの S ミリグラムとして表した。

### 1) 水稲の S 欠乏の実態把握

3 年間で供試土壌を可能な限り増やす方針で検討を行なった。2017 年は S 欠乏が疑われる秋田県北秋田市の 4 箇所から採取した水田土壌を、2018 年は秋田県北部の 2 箇所および水稲の S 欠乏が報告された広島県世羅町の 4 箇所から採取した水田土壌を、2019 年は事前の広域評価による可給態 S 水準から水稲の S 欠乏が懸念される岩手県内陸南部の 6 箇所から採取した水田土壌を供試し、常時湛水ポット栽培試験により水稲の石膏施与への応答を検討した。

### 2) 水田土壌の S 肥沃度ダイナミクスに関わる土壌化学的メカニズムと土壌診断法の検討

検討には、1) の供試土壌に加えて本研究以前に用いた各種水田土壌 20 土壌 (須磨ら 2016; 那花ら 2016) を含め、可給態 S だけでなく、還元土壌中で硫化物の形成に関わる Fe (湛水保温静置培養法による活性二価鉄量) および Fe 以外の可溶性金属 (亜鉛、鉛、カドミウム、銅、ニッケル等) も 0.1M 塩酸抽出画分として測定し、これらと常時湛水ポット栽培試験の結果による水田土壌の S 肥沃度との関係を詳細に考察した。また一部の土壌を用いて、各可溶性金属の、交換態、酸可溶態等といった形態別による検討も行なった。

上記の検討により、FeS よりも溶解度の低い金属硫化物の形成が水稲の S 欠乏と関係することが示唆されたことから、2018 年に宮城県仙台市の 1 箇所および秋田県北秋田市の 1 箇所の水田土壌を供試して亜鉛と銅をそれぞれ塩化物塩として人工的に添加した水稲の常時湛水ポット栽培試験を行い、可溶性金属の添加により水稲の S 欠乏が誘発されるかを確認した。

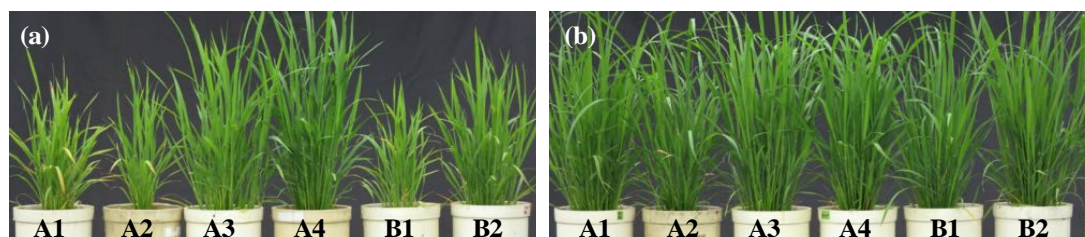
### 3) 土壤診断法を用いた水田土壌のS肥沃度の広域評価

水田土壌の可給態Sの水準を広域に検討するため、岩手県(n=257)と広島県(n=60)の農地の可給態Sを測定した。また、農地のS肥沃度変化を把握するため、岩手県および広島県が保管していた定点調査試料(それぞれ n=67, n=19)の可給態Sを測定した。

## 4. 研究成果

### 1) 水稻のS欠乏の実態把握

研究開始前の検討により、水稻のS欠乏は土壌に含まれる可給態Sの多寡および土壌還元に伴う難溶性硫化物(不溶性S)形成の量的関係により説明できる可能性が高いという作業仮説を得ていたため、ここでは「水稻のS欠乏の実態把握」すなわち常時湛水ポット栽培試験による水稻の石膏施与への応答を、上記の作業仮説を支持できるか否かにポイントを絞って整理した結果について述べる。2017年に実施した秋田県北秋田市から採取した4土壌を用いた常時湛水ポット栽培試験による水稻の石膏施与への応答(相対乾物重)は0.02~0.61であった。供試土壌の可給態Sは17~53 mg S/kgの範囲を示し、可給態S単独では相対乾物重を説明できなかったが、難溶性硫化物を形成する可溶性金属量(銅)と可給態Sとの量的関係を用いることにより結果を整理することができた(瀧野ら 2018)。同様に、2018年に実施した秋田県北部と広島県世羅町の6土壌を用いた栽培試験(途中の様子は写真を参照)の相対乾物重は0.10~0.86であったが、こちらも可溶性金属量(亜鉛と銅)と可給態Sとの量的関係により説明可能であった(鈴木ら 2019; Suzuki et al. 2019)。また、2019年に実施した岩手県内陸南部の6土壌を用いた栽培試験の相対乾物重は0.58~0.96で、いずれの土壌も可溶性金属が少なかったことから(難溶性硫化物形成によるS不足の考慮が不要なため)可給態Sの多寡だけで説明が可能であった。



写真：土壌の違いによる水稻の分けつ期S施与への応答事例(S施与14日後、(a) 对照、(b) S施与)

以上のように、3年間を通じて実施した17供試土壌を用いた栽培試験の結果は、当初の作業仮説「水稻のS欠乏は土壌に含まれる可給態Sの多寡および土壌還元に伴う難溶性硫化物(不溶性S)形成の量的関係により説明できる可能性が高い」を強く支持するものであった。

### 2) 水田土壌のS肥沃度ダイナミクスに関わる土壌化学的メカニズムと土壤診断法の検討

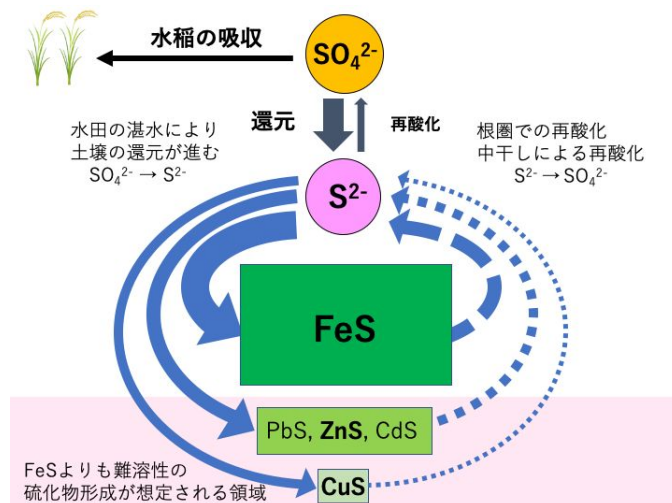
上記の作業仮説でも触れたように、水田土壌のS肥沃度を考える際には、可給態S(硫酸態S)の量だけでなく、土壌還元の進行に伴う硫酸態Sの消失(硫化物態Sの生成)と金属硫化物の沈殿(不溶性Sの生成)を想定する必要がある。水田土壌では硫化物イオンと二価鉄によるFeSの沈殿が主要生成物と考えられるが、栽培試験および土壌分析の結果を総合的に検討し、FeSを不溶性Sに含めない「溶解度の異なる金属硫化物形成が水田土壌のS供給力に関わるメカニズム」(次ページの図を参照)を構想するに至った。

このモデルは、米国環境保護庁の文書(U.S. EPA, 2005)に示された金属硫化物の溶解度の違い(FeS >> ZnS > CdS, PbS >> CuS)による底質中の金属イオンと硫化物イオンの反応メカニズムに基づき、その概要は次のように説明される。すなわち、湛水土壌中で可給態S(硫酸態S)の還元によって生じた硫化物態Sは溶液中に多量に存在する二価鉄イオンと反応してFeSを形成するが、可溶性亜鉛や銅が共存する環境では溶解度差のため硫化物態Sは更に溶解度の低いZnSやCuS等に移行する。これらの金属硫化物の溶解度はFeSに比べはるかに小さいため、土壌溶液中の硫化物態S濃度が極めて低く抑えられ(不溶性Sの生成)、FeS沈殿が溶液中の硫化物態S濃度を制御している場合に比べて、水稻根圏での再酸化を介して水稻に吸収されるSが不足し、結果として水稻のS欠乏が誘発されるというモデルである。この考え方では、FeS程度の溶解度があれば水稻が生育に必要なSを確保可能であること、また、土壌全体が酸化的になれば不溶性Sは再度可溶化すること(水稻の生育が中干しにより回復すること)も説明可能である。

このモデルの適用可能性については今後注意深く検証する必要があるが、可溶性亜鉛や銅を人為的に増やした土壌におけるポット栽培試験で、限られた土壌を対象としたものであるが、亜鉛および銅の人工的添加によって水稻のS欠乏が誘発され、さらに亜鉛と銅の硫化物の溶解度の違いも結果に関与することが明らかとなり(須磨ら 2017; 瀧野ら 2019)、難溶性硫化物の形成が水田土壌におけるS肥沃度に関与するメカニズムの一端を実証できたと考えている。

以上の結果を踏まえ、水田土壌のS肥沃度評価法として「可給態Sと難溶性硫化物形成に関わる可溶性金属の量的関係」を用いる次のような土壤診断法を提案する。すなわち、1) 土壌の可溶性亜鉛、鉛、銅などの物質質量合計が可給態Sの物質質量を上回る場合はS欠乏が強く懸念される、2) それ以外でも可給態Sが一定水準以下の場合はS欠乏に注意する、3) 上記以外の場合は

S 欠乏の心配はないというものである。なお、可給態 S の一定水準については、難溶性硫化物形成を考慮する必要があるが、Dobermann and Fairhurst (2000) による基準 (9 mg S/kg 未満) が適当と考えるが、可給態 S が 10~20 mg S/kg の領域についての判断には注意が必要である。また、対象とする可溶性金属の種類や分析法については、多くの検討と実証の余地が未だ残されていることを申し添えたい。



図：溶解度の異なる金属硫化物形成が土壤の S 供給力に関わるメカニズム (須磨ら 2017 を一部改変)

### 3) 土壤診断法を用いた水田土壤の S 肥沃度の広域評価

水田土壤の S 肥沃度の広域評価に関して、岩手県 (n=257) の農地の可給態 S を水準毎にまとめると、10 未満は 56 試料 (22%)、10~20 は 91 試料 (25%)、20 mg S/kg 以上は 110 試料であった (菅野ら 2018)。一方、広島県 (n=60) の可給態 S を水準毎にまとめると、10 未満は 38 試料 (63%)、10~20 は 21 試料 (35%)、20 mg S/kg 以上は 1 試料であった。水田土壤の S 肥沃度の目安を、難溶性硫化物の形成を考慮する必要がある場合は可給態 S が 10 未満の土壤では水稲は石膏施与に应答 (S 欠乏が発生) し、10~20 の範囲での应答の有無は様々、20 mg S/kg 以上で正常な生育を示すとすれば、可給態 S が 10 未満の圃場が岩手では 22%、広島では 63% を占めた今回の分析結果は、S 不足による水稲の生育抑制が特殊な事例ではないこと、そして今後の本格的な広域評価の実施の必要性を示唆するものであった。

岩手県の定点調査試料 (同一圃場の作土の 67 地点) おける昭和 50 年代の可給態 S の平均値は 62、平成 20 年代は 27 mg S/kg であった。また、平成 20 年代の可給態 S は殆どの地点で以前より低下していること、昭和 50 年代は可給態 S が 20 未満の圃場は 1 地点のみだったが平成 20 年代は 30 地点ほど認められることが明らかとなった。この結果は、土壤の可給態 S が何らかの要因 (無硫酸根肥料の施用推奨や S の天然供給量の低下等) により長期低落傾向であったことが、近年水稲の S 欠乏事例の報告が多くなっている理由の一つである可能性を示唆するものであった (菅野ら 2019)。広島県の 19 定点調査試料の可給態 S は、平成 20 年、24 年、26~28 年、28~30 年の平均値 (異常値を除く) で、それぞれ 24、23、18、15 mg S/kg となり、緩やかな減少傾向がみられた。また、平成 28~30 年は 19 定点のうち 8 地点で可給態 S が 10 mg S/kg 未満を示し、水稲の S 欠乏リスクが高いと考えられた (平成 20 年採取の定点試料には可給態 S が 10 未満の地点は認められなかった)。以上の結果は、岩手県で確認された事例と同様に、土壤の可給態 S の減少傾向が水稲の S 欠乏の報告が近年増えている理由の一つであることを示唆するものであった (菅野ら 2019)。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 0件／うち国際共著 0件／うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 菅野均志	4. 巻 41
2. 論文標題 水田土壌の硫黄（S）肥沃度評価に関する一考察	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 肥料科学	6. 最初と最後の頁 29-49
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 菅野均志	4. 巻 472
2. 論文標題 水田土壌における硫黄肥沃度について	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 季刊 肥料時報	6. 最初と最後の頁 5-32
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計11件（うち招待講演 3件／うち国際学会 1件）

1. 発表者名 A. Suzuki, M. Takino, H. Kanno, T. Makino
2. 発表標題 Response of paddy rice to gypsum topdressing in soils with different level of available sulfur and soluble metals
3. 学会等名 14th International Conference of the East and Southeast Asia Federation of Soil Science Societies (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 菅野均志
2. 発表標題 水田土壌の硫黄肥沃度をどう評価するか
3. 学会等名 第2回肥料科学研究会（招待講演）
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 菅野均志・葉上恒寿・清水健太郎・牧野知之
2. 発表標題 定点調査試料からみた水田土壌の可給態硫黄の変化 - 岩手県と広島県における測定事例 -
3. 学会等名 日本土壌肥料学会2019年度静岡大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 瀧野百重・菅野均志・高橋 正・金田吉弘・牧野知之
2. 発表標題 湛水土壌への垂鉛もしくは銅の添加と水稲の硫黄吸収との関係
3. 学会等名 日本土壌肥料学会2019年度静岡大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 鈴木彩乃・菅野均志・牧野知之・瀧野百重
2. 発表標題 可給態硫黄と可溶性金属レベルの異なる水田土壌における水稲の石膏施与への応答
3. 学会等名 日本土壌肥料学会2019年度静岡大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 菅野均志
2. 発表標題 水稲におけるイオウ欠乏の現状と対策
3. 学会等名 日本土壌肥料学会2019年度「土と肥料」の講演会（招待講演）
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 菅野均志・横田紀雄・数藤慶亮・古屋聡
2. 発表標題 水田土壌の硫黄肥沃度広域評価 - 岩手県における土壌の可給態硫黄の測定事例 -
3. 学会等名 日本土壌肥料学会2018年度神奈川大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 瀧野百重・菅野均志・高橋正・金田吉弘・南條正巳
2. 発表標題 北秋田市合川の水田土壌における水稲の石膏施与への応答
3. 学会等名 日本土壌肥料学会2018年度神奈川大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 菅野均志
2. 発表標題 水田土壌における硫黄肥沃度について - 可給態硫黄だけで説明できるのか? -
3. 学会等名 肥料経済研究会第1回研究会（招待講演）
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 須磨彩夏・那花友莉恵・菅野均志・高橋正・南條正巳
2. 発表標題 可給態硫黄濃度と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とその検証
3. 学会等名 日本土壌肥料学会2017年度仙台大会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 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
2. 発表標題 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
3. 学会等名 日本土壤肥料学会2017年度仙台大会
4. 発表年 2017年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
--	---------------------------	-----------------------	----