

2019年度 土と肥料の講演会
田んぼの土と肥料を考える～カリとイオウの不足を例として～
(2019年5月11日 東京大学山上会館)

水稻におけるイオウ欠乏の 現状と対策

東北大学 大学院農学研究科
菅野 均志

植物のS欠乏

新版 要素障害診断事典 (清水武・JA全農肥料農薬部, 農文協, 2018) 等

- 根から SO_4^{2-} として吸収される。生体内で酸化還元系に関与し、メチオニンやシステインなどの含硫アミノ酸を構成する。
- 症状**：水稻では分けつ期に発現、分けつ停止、草丈が伸長せず、下位葉葉先から淡緑～淡黄緑化、窒素欠乏症状に類似。
- 条件**：通常S欠乏の心配はないが、無硫酸根肥料を長期に連用した水田では懸念あり。滋賀県ではS欠乏に起因する初期生育抑制の報告あり。硫酸根を含む肥料の施与による葉色反応で判別可。
- 対策**：硫マグ、硫安、硫加、過石など硫酸根を含む肥料を施用するか、育苗期に硫酸カルシウムの施用を行う。

既往の研究

- 鈴木皓：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 (農技研報告29: 49-106, 1977)
- 辻藤吾：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: 454-463, 2000) ほか2報
- 小野寺ら：カドミウム汚染圃場における水稻生育停滞の回復技術 (宮城古川農試報9: 7-12, 2011)
- 岡山県東備農業普及指導センター：黄化イネの原因は硫黄欠乏と結論 (岡山県ウェブサイト 2012年11月16日掲載)
- 棚橋ら：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 新肥料規格による粒状肥料の開発と利用— (岐阜農技セ報16: 26-36, 2016)
- 広島県東部農業技術指導所：硫黄欠乏対策により水稻収量大幅改善 (世羅町) (広島県ウェブサイト 2018年1月5日掲載)

イネ植物体のS濃度レベル

Dobermann and Fairhurst (2000)

Table 17. Optimal ranges and critical levels of S in plant tissue.

| Growth stage | Plant part | Optimum (%) | Critical level for deficiency (%) |
|--------------|------------|-------------|-----------------------------------|
| Tillering | Y leaf | | <0.16 |
| Tillering | Shoot | 0.15–0.30 | <0.11 |
| Flowering | Flag leaf | 0.10–0.15 | <0.10 |
| Flowering | Shoot | | <0.07 |
| Maturity | Straw | | <0.06 |

- 栄養成長期の茎葉部S濃度>0.15% →施肥Sへの応答ない
- 分けつ期から出穂期の茎葉部S濃度<0.10%もしくはNS比>15~20 →S欠乏
- 登熟期のワラ中S濃度<0.06%もしくはNS比>14 (子実なら>16) →S欠乏

土壌のS肥沃度の診断

Dobermann and Fairhurst (2000)

土壌診断Sが対象とする形態

無機態Sと無機化可能な有機態Sの一部

S欠乏発生の限界値

- ・ < 5 mg S kg⁻¹: 0.05M HCl
- ・ < 6 mg S kg⁻¹: 0.25M KCl 抽出 (40°C, 3時間)
- ・ < 9 mg S kg⁻¹: 0.01M Ca(H₂PO₄)₂

水稻の石膏施与への応答と土壌の可給態S

常時湛水ポット栽培による 水稻の石膏施与への応答の検討

→ 供試20土壌による検討 (須磨ら, 日本土壌肥料学会2016年度佐賀大会)

(1) ポット栽培試験(2013, 2014, 2015)

[目的] 石膏処理区と対照区の出穂期に得られる乾物重を比較
→ 水稻の石膏施与への応答程度を判定

- [方法]
- ・ 1/5000aワグネルポットを使用
 - ・ 風乾土: 2.4 kg/pot
 - ・ 基肥: N、P₂O₅、K₂Oとして各々0.5 g/pot
 - ・ 常時湛水(灌漑水: 脱塩水)

2013 2014 2015

5/22 5/17 5/19

水稻‘ひとめぼれ’移植

6/22 6/20 6/19 (分けつ期)

石膏処理区(+S区) と 対照区(+0区)を設置

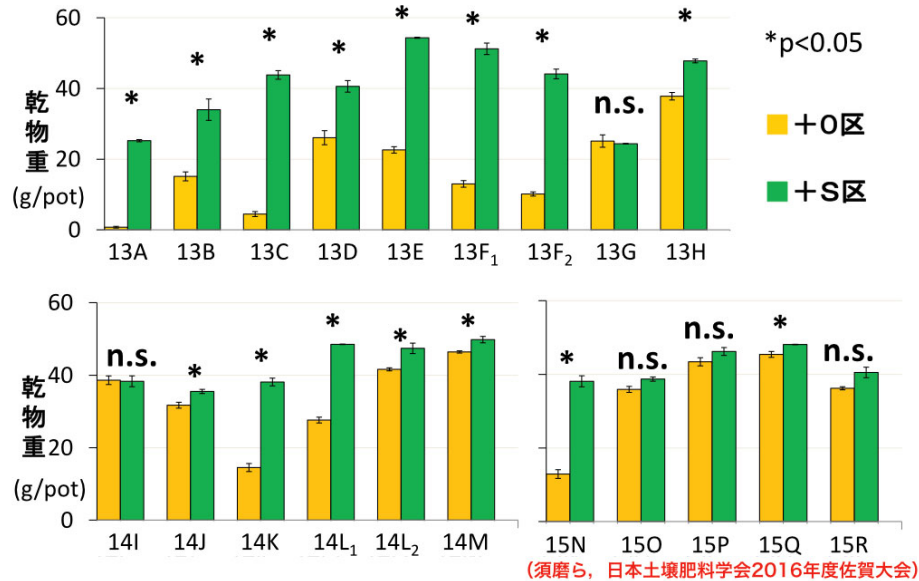
Sとして
0.45 g/pot

8/13 8/8 8/6 (出穂期)

地上部刈り取り

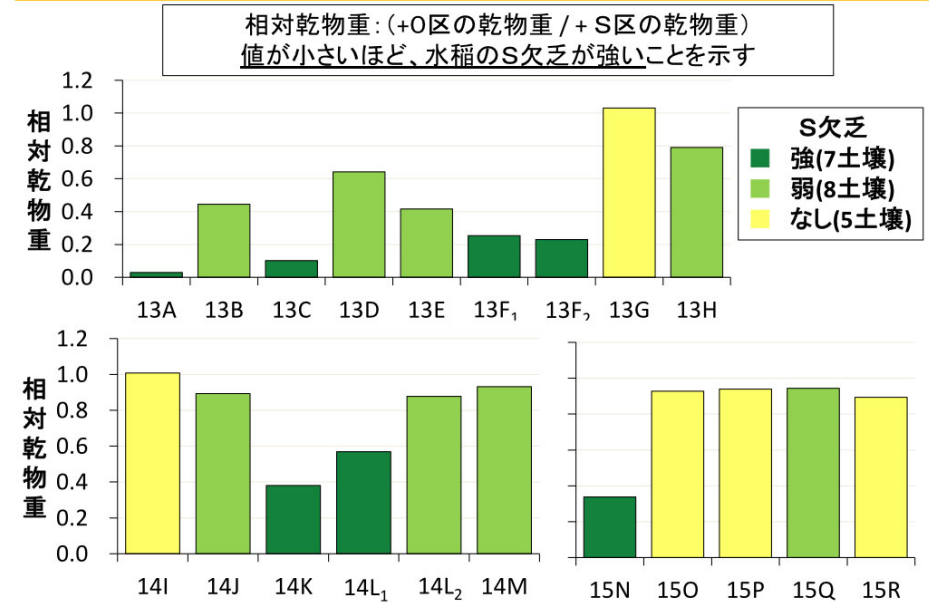


供試20土壌の水稲の地上部乾物重



供試20土壌の水稲の相対乾物重

(須磨ら, 日本土壤肥料学会2016年度佐賀大会)



難溶性硫化物形成を考慮したS肥沃度評価

FeSよりも難溶性の金属硫化物の形成によるSの不動化を想定した検討

背景1: イネのカドミウム吸収抑制技術

背景2: 米国環境保護庁 U. S. EPA の文書

背景3: 小野寺ら (2011) の報告

→ 供試20土壌の結果を再検討 (那花ら, 日本土壤肥料学会2016年度佐賀大会)

背景1: イネのカドミウム吸収抑制

還元土壌中で形成されるCdSは難溶性である

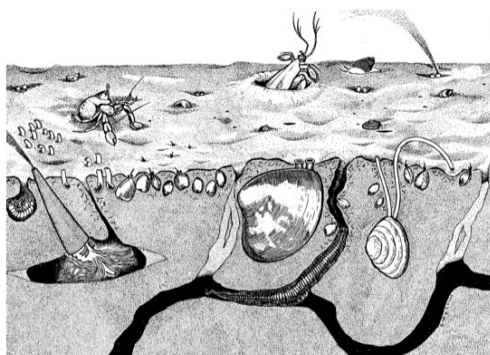
- ・ カドミウムによって汚染された水田における, 可食部へのカドミウム移行抑制のためにCdSの形態を利用
- ・ 出穂前後3週間を湛水状態で維持し, 水田土壌を酸化させずCdSの沈殿を維持し, カドミウムを溶解させない
- ・ CdSの沈殿によってカドミウムだけでなくSも溶解しなくなるが, 量的にはごく僅かなので問題はない

背景2：米国環境保護庁の文書

底生生物の保護のための平衡分配底質ベンチマーク
(ESBs) の導出手順：金属混合物 (Cd, Cu, Pb, Ni, Ag, Zn)

United States Environmental Protection Agency
Office of Research and Development
Washington, DC 20460
EPA-600-R-02-011
www.epa.gov

Procedures for the Derivation of Equilibrium Partitioning Sediment Benchmarks (ESBs) for the Protection of Benthic Organisms: Metal Mixtures (Cadmium, Copper, Lead, Nickel, Silver, and Zinc)



U.S. Environmental Protection Agency, Washington, DC, EPA/600/R-02/011 (NTIS PB2006-102425), 2005

各種金属硫化物の溶解度積

Table 2-2. Metal sulfide solubility products and ratios

| Metal Sulfide | $\text{Log}_{10}K_{sp,2}^a$ | $\text{Log}_{10}K_{sp}^b$ | $\text{Log}_{10}(K_{MS}/K_{FeS})$ |
|-------------------|-----------------------------|---------------------------|-----------------------------------|
| FeS | -3.64 | -22.39 | — |
| NiS | -9.23 | -27.98 | -5.59 |
| ZnS | -9.64 | -28.39 | -6.00 |
| CdS | -14.10 | -32.85 | -10.46 |
| PbS | -14.67 | -33.42 | -11.03 |
| CuS | -22.19 | -40.94 | -18.55 |
| Ag ₂ S | -36.14 | -54.71 | -32.32 |

^aSolubility products, $K_{sp,2}$ for the reaction $M^{2+} + HS^- \rightleftharpoons MS(s) + H^+$ for FeS (mackinawite), NiS (millerite), and CdS (greenockite) from Emerson et al. (1983). Solubility products for ZnS (wurtzite), PbS (galena), CuS (covellite), and Ag₂S (acanthite) and $pK_2 = 18.57$ for the reaction $HS^- \rightleftharpoons H^+ + S^{2-}$ from Schoonen and Barnes (1988).
^b K_{sp} for the reaction $M^{2+} + S^{2-} \rightleftharpoons MS(s)$ is computed from $\log K_{sp,2}$ and pK_2 .

溶解度：FeS >> NiS, ZnS > CdS, PbS >> CuS >>> Ag₂S

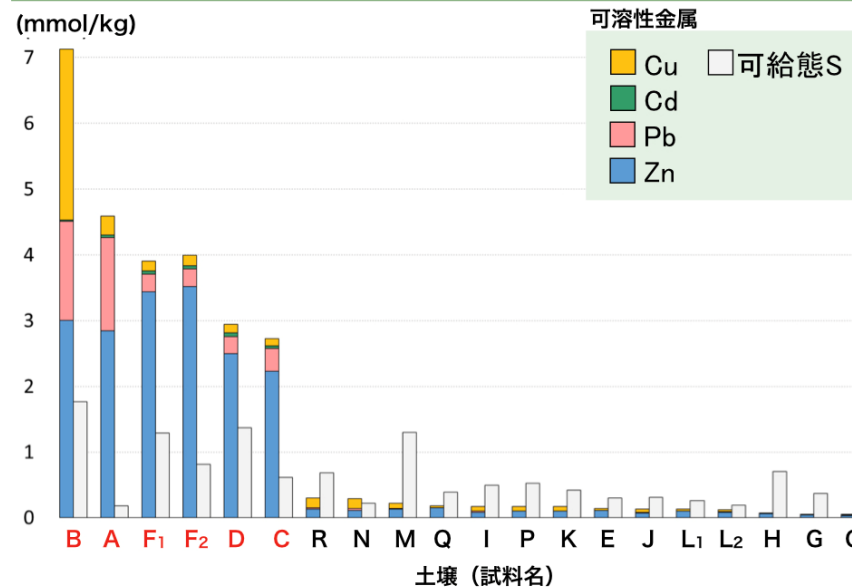
U.S. Environmental Protection Agency, Washington, DC, EPA/600/R-02/011 (NTIS PB2006-102425), 2005

MS(s)とFeS(s)が共存する底質における M-Fe-S系の反応

- MSがFeSより溶解度が低く
- 付加された金属 $[M]_A <$ 底質中の全硫化物 (AVS) ならMSが形成されて
- 底質-間隙水系では $[M^{2+}]$ は極めて低くなる (毒性低い)
- 底生生物の保護には **毒性金属 < 全硫化物** であればよい
→ **毒性金属 > 全硫化物** ならばどうなるか？

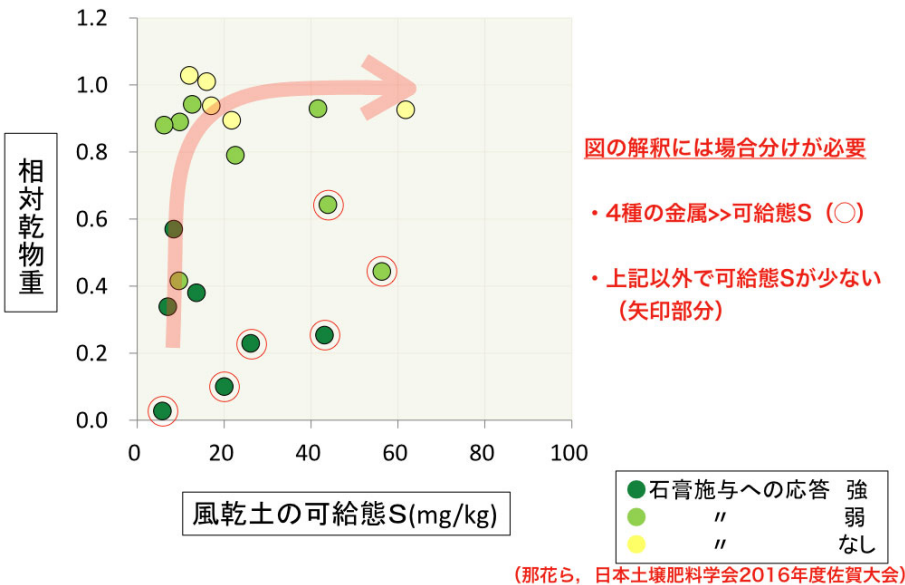
U.S. Environmental Protection Agency, Washington, DC, EPA/600/R-02/011 (NTIS PB2006-102425), 2005

4種の金属と可給態Sの物質質量



(那花ら, 日本土壌肥料学会2016年度佐賀大会)

(3) 可給態Sと水稻の石膏施与への応答



難溶性硫化物形成を考慮したS肥沃度評価

暫定的な判定方法

可給態S濃度と難溶性硫化物形成を考慮した水田土壌のS肥沃度評価法

Zn, Pb, Cd, Cuの合計物質質量 > 可給態Sの物質質量… S欠乏発生

上記以外 — 可給態S (mg/kg)が一定水準以下…… S欠乏発生

上記以外…………… S欠乏なし

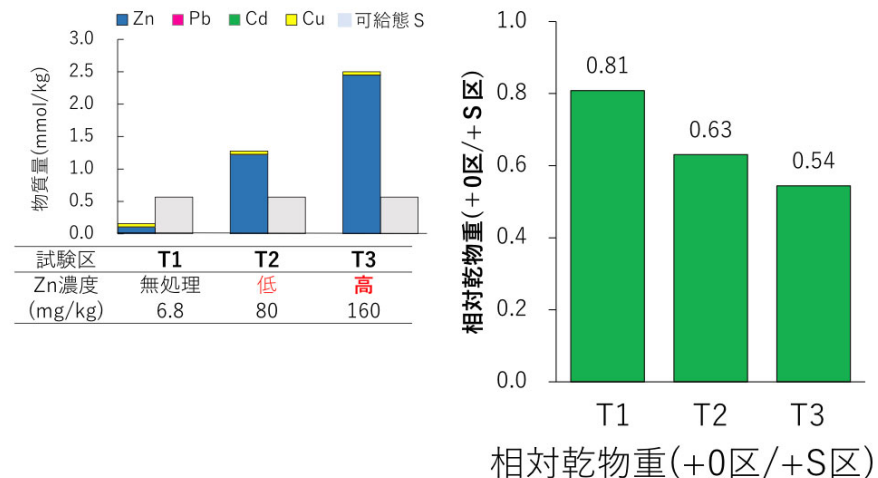
(那花ら 2016 を一部改変)

難溶性硫化物形成を考慮したS肥沃度評価

難溶性硫化物形成によるS不働化と水稻のS欠乏の誘発は本当か？

→ 亜鉛添加による検証 (須磨ら, 日本土壤肥料学会2017年度仙台大会)

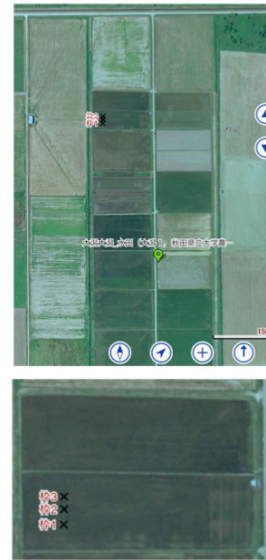
(2) 栽培試験—水稻の地上部乾物重



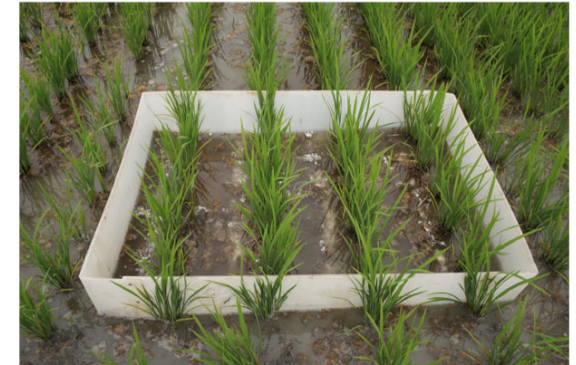
ポット栽培試験の結果は 現地圃場にあてはまるのか？

- ・ポット試験：生育停滞につながるS不足が強くなる条件が揃っている
- ・現地試験：作土の還元の進行や維持、作土以外からのS供給等の条件が異なる
- ・そのため、S不足による生育停滞程度は現地では弱くなること多いかもしれない
- ・土壌診断結果は、条件が揃えば水稻のS不足が問題となる可能性を指摘している

秋田県立大学フィールド教育研究センター(大湯村)の水田圃場における 水稻の石膏施与への応答に関する枠試験(予備試験)

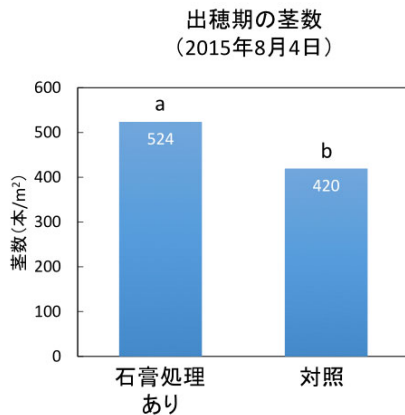


品種: あきたこまち
 処理: 2015年6月26日に120×80センチの枠(4条5株)を3箇所設置
 試薬の二水石膏 50 g/m²(Sとして 9.3 g/m²)を表面条施肥
 生育調査: 8月4日(出穂期)に枠中央部(石膏処理あり)および
 枠に隣接した区画(処理なし)の2条3株(6個体)を調査
 収量調査: 9月16日に枠内および枠に隣接した区画(処理なし)の
 4条5株(18+2)を刈取調査[佐藤孝先生に全てを依頼した]

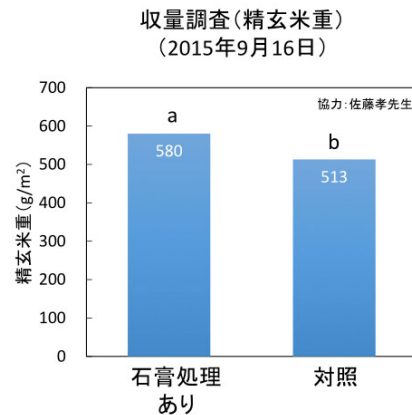


(菅野ら 未発表)

秋田県立大学フィールド教育研究センター(大湯村)の水田圃場における 水稻の石膏施与への応答に関する枠試験(予備試験)



草丈(平均 94.9 cm), 葉色(SPAD値 35.4)に有意差は認められなかった



石膏処理は穂数が多く、一穂粒数が少ない
 千粒重や登熟歩合に有意差は認められなかった

(菅野ら 未発表)

現地枠試験

試験の実施地

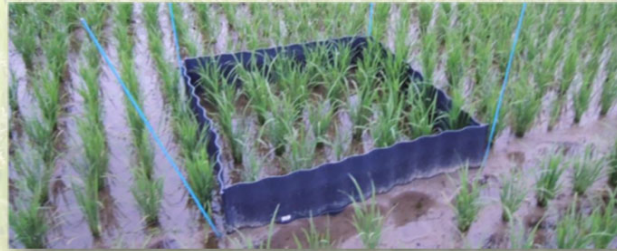


現地枠試験

目的 含硫資材の施用効果を検討

方法 2016年6月中旬に畦畔版を設置
硫マグを20 kg/10a施用

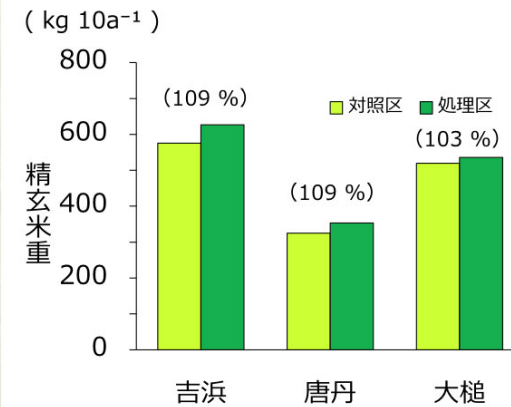
参考：古川農試「硫黄欠乏による水稻の生育停滞の回避対策」



2016年6月28日（施用後13日）吉浜

(古屋ら, 日本土壤肥料学会2017年度仙台大会)

現地枠試験



精玄米重

※ () 内の数字は対照区比を示す

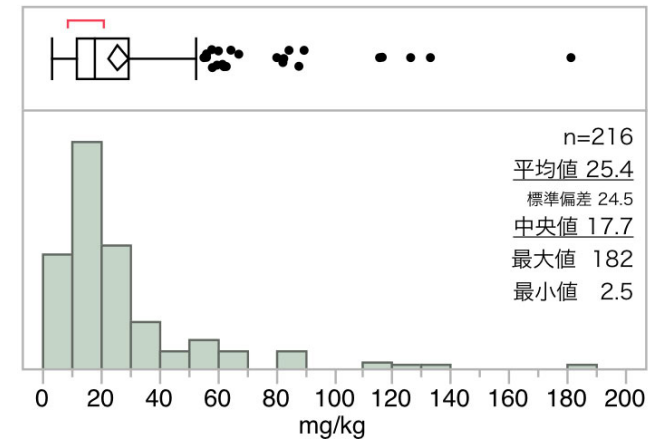
(古屋ら, 日本土壤肥料学会2017年度仙台大会)

水田土壌の可給態Sの実態

低い可給態Sの農地は特別なのか？

岩手県内216土壌の可給態Sの頻度分布

北上川上流 (11), 北上川下流 (63), 東部 (129), 北部 (13)



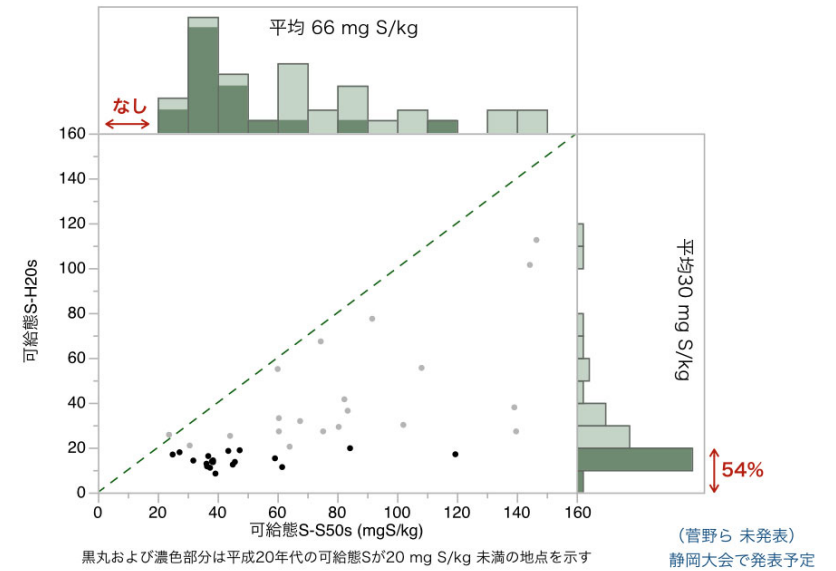
10未満は41試料 (19%), 10~20は82試料 (38%), 20 mg/kg 以上は93試料

(菅野ら 2018)

農地の可給態Sが少なくなったのか？

岩手県の定点調査試料における可給態Sの年代比較

両年代の試料が揃っている定点調査地点（岩手県）の作土39試料の可給態S



今後の課題

- 土壌診断によるS肥沃度評価法の確立と広域評価
- S資材の効率的施肥法の検討
- 隠れたS欠乏圃場での窒素施肥量の最適化
- 水田土壌のS収支の検討