

平成 30 年 6 月 20 日現在

機関番号：82104

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2015～2017

課題番号：15K21614

研究課題名(和文)ケイ素欠乏がアフリカのイネ生産に及ぼす影響の解明とケイ素管理技術の開発

研究課題名(英文) Identifying the effect of silica on rice production and development of silica management practices in Africa

研究代表者

辻本 泰弘 (TSUJIMOTO, YASUHIRO)

国立研究開発法人国際農林水産業研究センター・生産環境・畜産領域・主任研究員

研究者番号：20588511

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,200,000円

研究成果の概要(和文)：多点圃場での栽培試験に基づき、ケイ素の施用がイネ生産に有意な増収効果をもち、特に窒素肥料と組み合わせることでその効果が大きくなることを風化土壌の卓越するサブサハラ地域で初めて実証した。また、その施用効果には圃場間で大きな変異がみられ、水田よりも陸稲圃場で効果が大きいことを明らかにした。さらに、圃場環境にかかわらず、稲穂と稲わらのケイ素濃度に高い相関がみられ、これまでケイ素欠乏指標として利用されてきた稲わらのケイ素濃度は、サンプルの採取と調整が容易な稲穂のケイ素濃度で代替できる可能性を示した。

研究成果の概要(英文)：Multi-location trials in this study demonstrated for the first time the positive and significant effect of silica (Si) application on rice yield on highly-weathered soils in Africa. We further identified that the Si application effect was particularly large when it was combined with N application and in upland rice fields relative to the lowland rice fields. In addition, the analysis of 299 set of grain and straw across Africa showed high correlation ($R^2=0.837$) between Si concentration in grain and that in straw irrespective of field environments or management practices. The result suggested that the Si concentration in grain can be used as an alternative Si-deficiency indicator easier to collect and analyze than the conventional straw Si concentration.

研究分野：作物学

キーワード：イネ ケイ素 アフリカ 風化土壌

1. 研究開始当初の背景

アフリカでは、高まるコメの需要を満たすため、イネの生産性向上が求められている。しかし、同地域に分布する土壤の多くは強度に風化が進んでいることから、イネの生産性向上には窒素以外の様々な養分欠乏への対策が不可欠と考えられる。

これまでの研究成果において、(1) アフリカで栽培されるイネの多くが、土壤のケイ素(Si)供給力不足に起因するSi欠乏状態にあること、(2) 施肥や土壤からの窒素供給が増加すると、Si欠乏といもち病の発生が助長され得ることを明らかにしている^{1,2)}。

イネは体内にケイ素を多量に蓄積することで、病虫害などへの耐性を高める機能をもつことが知られるが、これらの成果はアフリカでイネの生産性を向上させるためには、窒素のみではなくSiの肥培管理を考慮しなければいけないことを強く示唆している。しかし、アフリカでSi欠乏とイネの病害発生および収量との関係を評価した研究はなく、具体的なSi管理技術もみられない。

2. 研究の目的

本研究では、アフリカのイネ生産圃場を対象にして、主要病害であるいもち病の発生と土壤のSi供給力およびイネのSi濃度との関係を明らかにするとともに、Si資材の施用によるケイ素欠乏の改善がイネ収量に及ぼす効果を実証することを目的とした。

また、イネのSi欠乏基準値として、我が国のSi施用試験に基づく「稲わらのSi濃度<5%」が熱帯の稲作地域でも広く用いられてきたが³⁾、稲わらを基準に圃場の代表値を推定するには、多数の稲株を採取する必要があり労力がかかることから、稲わらのSi濃度との関係を解析することで、稲籾、もしくはSiが集積する籾殻のSi濃度を用いた新たなSi欠乏指標を提案することを試みた。

3. 研究の方法

3-1. ケイ素施肥がイネ収量に及ぼす効果

アフリカの主要なイネ生産国であるマダガスカル中央高地で、2か年にわたりのべ34地点の農家圃場(陸稲11地点、水稲23地点)を対象に、T1:無施肥、T2:窒素(N)施肥のみ、T3:Si施肥のみ、T4:NとSiの混合施肥、の4水準の施肥処理を設け、Siの施用がイネ収量に及ぼす効果を比較した。施肥区のN量は 5 g m^{-2} 、Si量は SiO_2 として 20 g m^{-2} とし、それぞれ尿素および農業用シリカゲルを移植後1か月以内に表層施肥した。国際稲研究所(IRRI)のStandard Evaluation System for Riceに則って、出穂期前後にいもち病害の程度を評価し、成熟期に刈り取りによる収量調査と標準的な生育をもつ8個体の抜き取りによる収量構成要素およびNとSiの養分吸収量の分析を実施した。さらに、試験開始前に、各圃

場から表層土壤0-15cmを採取して、土壤酢酸緩衝液可溶性Si量⁴⁾と湛水静置法による水溶性Si量⁵⁾を含む主な土壤物理化学特性を分析し、Si施用効果の圃場間差異との関係を解析した。

加えて、マダガスカル中央高地に分布する極風化土壤のFerralsolsとは異なる土壤型で、砂質土壤が分布するガーナ北部の水田圃場2地点において、3作期にわたる連用試験で、Si施肥がイネ収量に及ぼす効果を検証した。

3-2. 新たなSi欠乏指標の開発

上述の試験を含めてこれまで研究代表者が採取したアフリカの主要な稲作地域を網羅するのべ7か国299点(陸稲90点、水稲209点)の稲籾と稲わらについて、そのケイ素濃度を分析して、双方の相関を解析した。サンプルセットは、様々な気象環境、土壤環境、栽培法、品種、収量性などを網羅するものと考えられる。

4. 研究成果

4-1. アフリカに広く分布する風化土壤でケイ素施肥によりイネ収量が有意に増加

マダガスカル中央高地における試験圃場34地点は、無施肥区の収量 $0.54\sim 6.20\text{ t ha}^{-1}$ 、表層土壤のpH(土液比1:2.5) $4.1\sim 6.4$ 、粘土含量 $5.1\sim 45.4\%$ 、全炭素量 $0.81\sim 6.01\%$ 、陽イオン交換性容量 $\text{CEC}1.4\sim 17.5\text{ cmol kg}^{-1}$ 、湛水保温静置法による水溶性Si量 $13.8\sim 117.5\text{ mg kg}^{-1}$ 、酢酸緩衝液可溶性Si量 $29.1\sim 188.9\text{ mg kg}^{-1}$ の範囲にあり、土壤のケイ素供給力とその他の理化学性、およびイネの生産性に極めて多様な変異をもつ圃場環境を網羅した(図1)。

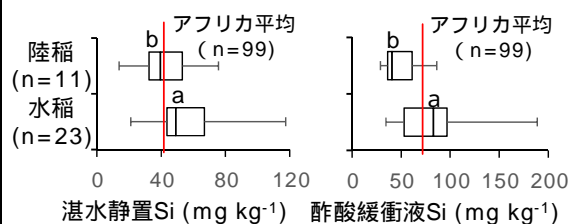
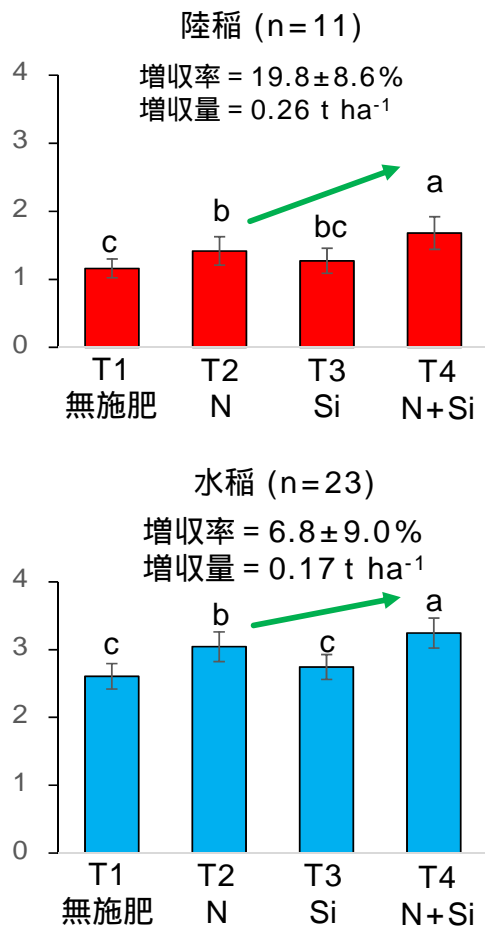


図1. 試験圃場における土壤のケイ素供給力の変異を箱ひげ図で示した。図中のアフリカ平均(n=33)はTsujiimoto et al. 2014の広域調査のデータを抜粋した。異なるアルファベットはt検定で有意差あり

分散分析の結果、処理の効果が有意にみられ、籾収量は圃場間の平均値で、 $T4(2.69\text{ t ha}^{-1}) > T2(2.49\text{ t ha}^{-1}) > T1(2.11\text{ t ha}^{-1})$ の順に高く、T1とT3(2.24 t ha^{-1})には有意差がなかった。すなわち、Siの単独施用(T3)ではなく、窒素肥料と組み合わせる(T4)ことで、Si施用によるイネの増収効果が発揮されることが分かった。特

に、水稲圃場に比べて、陸稲圃場で安定した Si 施用の効果がみられ、陸稲圃場 (n=11) では、T2 に対して T4 の収量が $0.26 \pm 0.16 \text{ t ha}^{-1}$ (平均 \pm 標準偏差) もしくは 19.8% 増加した。一方の水稲圃場では、処理と圃場に有意な相互作用がみられ、T2 に対する T4 の増収量に $-0.15 \sim 0.91 \text{ t ha}^{-1}$ のばらつきがみられた (図 2)。陸稲圃場は水稲圃場に比べて土壌のケイ酸供給力がともに低い傾向にあったが (図 1)、水稲圃場間にみられた Si 施用効果の差異を量的に説明できる土壌特性値は本データセットの中では検出することができなかった。

図 2. 陸稲圃場 (図上) と水稲圃場 (図下) でケイ素施用がイネの収量 (t ha^{-1}) に及ぼす効果。異なるアルファベットは Tukey の多



重比較検定で有意差あり。図中の誤差バーは圃場間の標準誤差 (n=34)。

イネの Si 吸収量は、T2 に対して T4 の Si 吸収量は平均で 14.4% 有意に高く、施肥 Si の回収率 = (T4 の Si 吸収量 / T2 の Si 吸収量) / Si 施肥量は、圃場間で極めて大きなばらつきがみられるものの平均すると $25.9 \pm 29.3\%$ (平均 \pm 標準偏差) の値が得られた。Si 濃度には、T2 と T4 との間に有意な差はみとめられなかったものの、稲わらと稲初の Si 濃度の平均値は T2 で 2.32% と 5.18%、T4 で 2.39% と 5.41% となり、Si 施用により稲体 Si 濃度の微増傾向がみ

られた。

次に、Si 施用による増収要因を解析するために、収量構成要素およびいもち病害の発生程度を比較した。結果、いずれの圃場においても顕著ないもち病害の発生がみられず、出穂期前後のいもち病害程度に有意な処理間差はみとめられなかった。また、収量構成要素を比較したところ、登熟歩合と 1000 粒重に処理間差はみられず、収量の差は、主に粗粒数に起因することがわかった。このことから、Si 施用による増収効果は、病害の抑制効果ではなく、乾物生産および籾 (シンク) 生産の増大に起因することが示唆された。

追加で実施したガーナ北部の砂質水田での実験においても、Si の施用により、現地の主要普及品種である Jasmine85 の収量が、3 作期にわたり一貫して 16.1 ~ 25.9% 有意に増加した。この増収についても、主に粗粒数の増加に起因し、顕著な病害発生や登熟不足の処理間差は観察されなかった。また、同実験では、Si の施用効果に有意な品種間差異がみられ、熱帯地域の主要改良品種である IR64 には Si 施用の効果がみられなかった (図 3)。相互作用の要因は不明であるが、これまで検証されていない西アフリカの水田圃場でケイ素施用の収量への実質的な効果を示したこと、また、その品種間差異を観測したことは新規性の高い結果といえる。

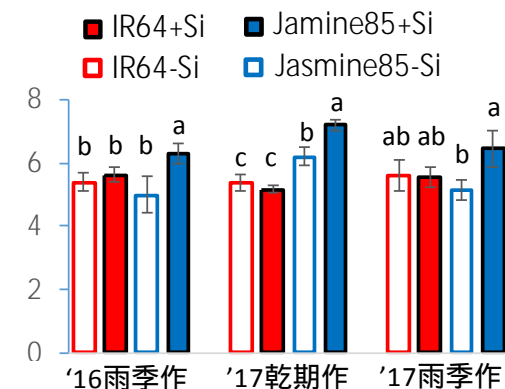


図 3. ガーナ北部の砂質土壌におけるケイ素施肥と品種の交互作用がイネ収量に及ぼす効果。異なるアルファベットは、各作期内で Tukey の多重比較検定で有意差あり。図中の誤差バーは反復間の標準誤差 (n=4)。

4 - 2. 稲初 Si 濃度を用いた新たな欠乏評価の可能性

アフリカ広域の多様な栽培環境から採取されたのべ 299 点の稲初と稲わらの Si 濃度の関係性を解析したところ、両者に高い相関関係がみとめられた。このことから、サンプル採取がより容易な稲初の Si 濃度を基準とした Si 欠乏評価が可能であることが示唆された。当てはまりのよい近

似式を検討したところ、
 稲わら Si%=
 $2.7734 \times \text{稲籾 Si\%} - 0.2151 \times (\text{稲籾 Si\%})^2$
 の2次式で、双方の変動の83.7%が説明された。同近似式に基づく、これまで用いられてきた「稲わらのSi濃度<5%」は、「稲籾のSi濃度<2.17%」に代替できる可能性が示された。

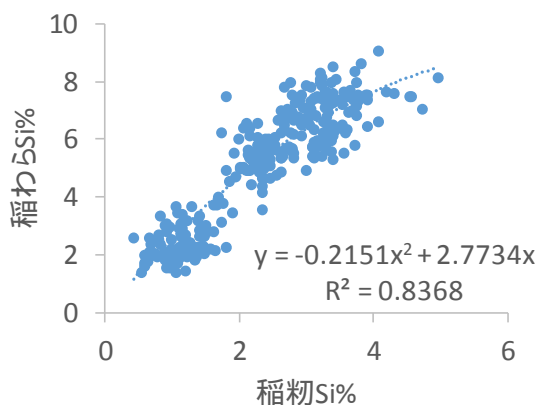


図4. アフリカ広域で採取された稲籾と稲わらのSi濃度の関係 (n=299)。

本研究で実施した多点の農家圃場での栽培試験結果に基づき、ケイ素の施用がイネ生産に対して有意な増収効果をもつことが風化土壌の卓越するサブサハラ地域で初めて実証された。さらに、その効果は、イネ生育に対するケイ素の主たる役割として一般に考えられる病害発生の抑制という機能を介さなくても発揮されることが示された。ただし、その施用効果には圃場間で大きなばらつきが認められ、水田よりも陸稲圃場で効果が大きいことが分かった以外には、圃場間差異の主たる要因は明らかにできなかった。より効率的なケイ素施用を実践するうえで、圃場間差異の要因を明らかにするための更なる研究が求められる。また、これまでケイ素欠乏の指標として利用されてきた稲わらのケイ素濃度が稲籾ケイ素濃度で代替できる可能性を示した意義は大きいと考えられた。

引用文献

- 1) Tsujimoto, Y., Homma, K., Shiraiwa, T., 2010. The effects of soil drying and rewetting on rice growth in lowland aquatic Ferralsols in the southeastern forest region of Madagascar. *Plant Soil* 333, 219-232.
- 2) Tsujimoto, Y., Muranaka, S., Saito, K., Asai, H. 2014. Limited Si-nutrient status of rice plants in relation to plant-available Si of soils, nitrogen fertilizer application, and rice-growing environments across Sub-Saharan Africa. *Field Crops Res.*
- 3) Dobermann and Fairhurst, 2000. Rice:

Nutrient disorders and nutrient management. IRRI, Los Banos, Philippines.

4) 土壤養分測定法委員会編、1970. 土壤養分分析法、pp. 278-280、養賢堂、東京.

5) 高橋和夫、野中邦彦、1986. 水田土壌中の有効態ケイ酸の測定法、*日本土壤肥料学会誌* 57 (5)、515-517.

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計 0件)

[学会発表](計 4件)

辻本泰弘、Tovohery Rakotoson「熱帯のイネ作付け圃場におけるケイ素施用の効果と圃場間差異の解析」、2017年度土壤肥料学会、2017年

辻本泰弘「フィールド研究のわくわく~アフリカの作物生産改善を目指して~」、第132回日本育種学会シンポジウム、2017年(招待講演)

辻本泰弘、Tovohery Rakotoson「マダガスカル中央高地においてケイ素施用がイネの窒素利用効率と収量に及ぼす影響」、2016年度土壤肥料学会、2016年

辻本泰弘「アフリカで農業と格闘する~生産現場での取り組み~」、第2回農学中手の会研究集会、2016年

[図書](計 1件)

辻本泰弘、「第7章 マダガスカルの稲作生態とSRI稲作」(堀江武編「アジア・アフリカの稲作」、pp. 172-196、農文協出版、2015年

[産業財産権]

出願状況(計 0件)

取得状況(計 0件)

[その他]

国際研究集会1件、Tsujimoto, Y., Dogbe, W., Effect of water stresses and silica fertilization on heat stress and production of rice in West Africa. 国際シンポジウム「気候変動下のイネの高温障害にたちむかう国際観測ネットワーク MINCERnet」(2018年1月つくば市開催)

6. 研究組織

(1)研究代表者

辻本 泰弘 (TSUJIMOTO, Yasuhiro)

国際農林水産業研究センター・主任研究員
 研究者番号: 20588551

(2)研究分担者 なし

(3)連携研究者 なし

(4)研究協力者

Dr. Tantely Razafimbelo

アンタナナリボ大学放射線研究所

所長

Dr. Tovohery Rakotoson

アンタナナリボ大学放射線研究所

研究員

Dr. Wilson Dogbe

ガーナ国サバナ農業研究所

稲作部長