

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 12 日現在

機関番号：15201

研究種目：基盤研究(B)

研究期間：2012～2014

課題番号：24405047

研究課題名(和文) 熱帯地域における可給態ケイ酸動態調査と稲作のための自然供給システム構築

研究課題名(英文) Investigation of available silica dynamics in tropical regions and establishment of natural silica supply system for rice production

研究代表者

増永 二之(MASUNAGA, TSUGIYUKI)

島根大学・生物資源科学部・教授

研究者番号：10325045

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,300,000円

研究成果の概要(和文)：熱帯地域の稲作の安定化と増収は世界の安全保障上重要である。熱帯地域で実現可能な病虫害抑制・水利用効率向上方法として土壌中の可給態ケイ酸管理について研究を行った。インドネシアでは、国際イネ研究所が示す基準よりも土壌中の可給態ケイ酸含量が高くともいもち病は発生し、ケイ酸施用により改善できる事が実証された。ナイジェリアの新規水田中の可給態ケイ酸含量はアジアの半分程度であり、今後集約的な稲作により大きく減少する事が予想される。ケイ酸供給について、水田集水域でのケイ酸動態を調査し、また農民が利用可能なケイ酸資材として、現地のケイ酸含有産業副産物やカカオや竹の葉のような植物資材の利用可能性を示した。

研究成果の概要(英文)：It is important to stabilize and increase the rice production in tropical regions for world food security. We studied available silica management of lowland paddy fields as a feasible measure of disease and pest control and improvement of water use efficiency in tropical regions. In Indonesia, blast disease has occurred even though the soil available silica level is beyond the recommendation of International Rice Research Institute. The blast disease could be reduced by silica fertilizer application in our field experiment. Soil available silica levels in newly developed lowland paddy fields in Nigeria was about half of the Asia. It was expected that it could be lowered through intensive rice production. On silica supply, we investigated silica dynamics in a rice cultivating watershed and also showed possible use of industrial residual products containing silica and plant materials such as cacao and bamboo leaves as silica amendments available for local farmers.

研究分野：土壤肥料学

 キーワード：熱帯稲作 可給態ケイ酸 いもち病 耐ころび倒伏 インドネシア ケイ酸資材 ナイジェリア ガー
ナ

1. 研究開始当初の背景

南・東南アジアの主要作物であるイネは現在、アフリカ・中南米の含め世界の熱帯地域においても主要穀物の一つとなり、その面積および生産量は他の作物に比べ大きく増加し、例えばサブサハラアフリカでは、過去30年で生産量が倍増している(FAOSTAT 2010)。世界の食糧安全保障のために、稲作による食糧生産増加は必須事業であり、そのためには、品種開発・普及と同時に栽培システムの改善を同時に行う必要がある。各地域に適した高収量品種の開発研究は国際イネ研究所やアフリカ Rice センターが中心となり進め、日本をはじめとするアジア諸国、欧米諸国による灌漑設備の整備や稲作技術指導を実施している。その結果、熱帯地域の発展途上国においても、近年、改良品種および化学肥料は普及しつつある。しかし熱帯稲作における主な制限の一つである養分の供給・管理については、窒素・リン酸以外には未だ関心が払われず、世界の稲作の中心である東南アジアにおいてすら研究が遅れている。稲作におけるケイ酸の供給・管理はその最たる制限要因である。

イネ生育におけるケイ酸の役割として、耐病性、耐倒伏性、過蒸散抑制による水利用効率の向上と光合成増進(水ストレス軽減—葉身直立—受光効率 up)などがあげられる(高橋 2007)。そしてこれらの効果を通じて生産増加に寄与しており、日本では“農学的必須元素”として認識されている。イネを始め各種植物によるケイ酸の吸収と生理作用、植物が利用できる土壤中の可給態ケイ酸の分析評価などの研究は、日本での研究が進んでおり、日本では土壤中 Avail Si の基準の設置、ケイ酸資材の開発販売が実施されている。しかし、米どころのアジアにおいてすらケイ酸栄養に関する研究は進んでおらず、熱帯地域におけるケイ酸の動態や、イネ生育への影響は不明である。

熱帯地域の稲作では、水管理(水不足、洪水)、貧栄養土壌、雑草・病虫害防除などの制限要因があるが、経済的制約により物資を投入しての対策は困難な現状である。ケイ酸供給改善による、稲作制限要因に対する抵抗性の向上や、半乾燥地域においては、ケイ酸による水利用効率の向上は、実現可能な生産増加のオプションとして期待できる。

インドネシアの稲作集水域において、土壤中の可給態ケイ酸および環境水中の溶存態ケイ酸の調査を行い、過去30年の集約的稲作により低地水田土壤中の可給態ケイ酸が22%減少していること、灌漑水中の溶存態ケイ酸(以下 DSi)が同時期に約50%減少していることを明らかにした(Darmawan et al.2006)。灌漑水中の DSi 減少の原因として、上流域における畑作で施用された窒素・リン酸などの栄養塩が、河川や湖沼に流入しケイ藻の繁茂とそれによる DSi の多量吸収が原因である事を推察した(Husnain et al.2009)。他の熱帯地域

においても、集約的な稲作の普及および集水域内での NP など化学肥料の施用と水環境汚染により、可給態ケイ酸賦存・供給量が減少することが予測される。

今後の、熱帯地域における集約的な稲作の普及と生産増加を達成するためには、熱帯地域における可給態ケイ酸の分布と動態の解明、稲作地(水田)土壌の管理や供給方法の提言が必須である。

2. 研究の目的

(1) 熱帯稲作地域の土壌中可給態ケイ酸レベルといもち病発生との関係について現状調査
熱帯地域稲作地の可給態ケイ酸含量の調査データはほとんど見当たらず、また、土壌中可給態ケイ酸含量レベルと病虫害の関係に関する調査も全く行われておらず、本研究では熱帯地域稲作地(インドネシアおよびガーナ、ナイジェリア)の調査による現状把握を行った。そして、インドネシアにおいては、土壌中の可給態ケイ酸レベルと現地稲作において主要な病害であるいもち病の発生程度との関係についても調べた。

(2) ケイ酸施用によるいもち病抑制・水利用効率向上効果の現地実証試験

日本においては、すでにケイ酸施用による稲の耐病虫害性の向上が実証され長年ケイ酸肥料の施用が行われてきている。ケイ酸集積によるイネの病虫害抵抗のメカニズムは、表皮へのケイ酸の沈着—シリカ層形成による物理的防御である。この作用機構は、病虫害の種類には依存せず、熱帯地域でも作用する事が期待される。またシリカ層は、クチクラ蒸散抑制にも寄与してイネの水利用効率を改善する事が報告されており、水供給が不安定な地域において、イネの耐乾燥性を高めることによりコメ生産の安定化や増収、稲作地の拡大に寄与する事が期待される。これらの事を、熱帯現地で実証確認するために、インドネシアにおいてポット試験および圃場試験を行った。

(3) ケイ酸供給方法の検討

熱帯の稲作新興国、特にアフリカ地域には発展途上国が多く、日本などからのケイ酸肥料の輸入利用は非現実的であり、現地農民レベルで実現可能な水田土壌のケイ酸管理方法を検討する必要がある。本研究では、現地で入手可能なケイ酸資材の評価、水田へのケイ酸の自然供給システムについて考察を行った。

3. 研究の方法

(1) 熱帯地域の水田土壌中可給態ケイ酸レベルの現状把握といもち病との関係調査

インドネシア West Java 州(いもち病発生地)および Lampung(水不足地域)の水田を対象に、肥培管理や栽培品種などの調査および土壌とイネ体試料の採取を行った。いもち病害発生頻度や程度を各地で聞き取り調査し、被害の異なる水田から土壌を採取・分析した。

ナイジェリアで最近開田された新規水田の土壌特性を調べた。土壌は 5 州 20 地点の圃場から採取し、理化学分析を行った。

ガーナ、アシャンティ地方において、2000 年に開田された水田を含む集水域から土地利用毎に土壌を採取分析し過去の土壌分析結果と比較し、土壌肥沃度および可給態ケイ酸含量におよぼす、土地利用の影響について考察した。

(2) ケイ酸施用効果の検証

インドネシア土壌研究所と連携してポット試験および西・中央ジャワ州のいもち病多発地域において圃場試験を行った。試験区は、日本製のシリカゲル肥料の施用の有無 ($500\text{kgSiO}_2\cdot\text{ha}^{-1}$) と、水管理(常時湛水、間断灌漑、節水(土壌中は常時飽和))を組み合わせて設定した。植物生育・収量調査、土壌・植物採取分析、気孔観察、いもち病調査、茎の挫折抵抗強度・耐ころび倒伏強度測定を行った。

(3) ケイ酸供給方法の検討

インドネシアで入手可能なケイ酸含有資材(鉄鋼スラグ、石炭灰、火山灰、植物、堆肥など)を探索入手し、種々の抽出法(水、炭酸アンモニウム、 0.5MHCl 、酢酸緩衝液($\text{pH}4$)、 0.1M クエン酸、 0.01M CaCl_2)により可給態ケイ酸含量の測定を行い、ケイ酸の可給能について評価を行った。

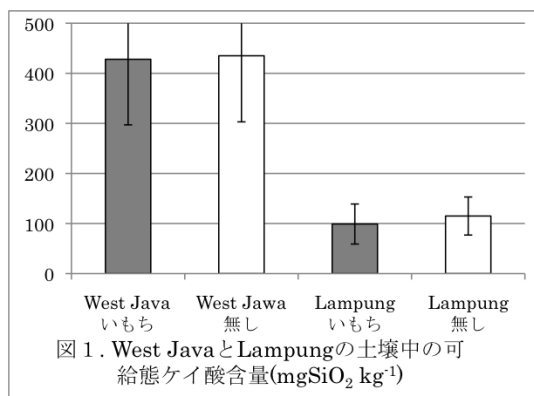
土壌の可給態ケイ酸供給改善方法を検討するために、化学肥料を含まない土壌に有機肥料又は単離した微生物を添加して、蒸留水を加えた後に振盪培養した。培養後に蒸留水に溶出されたケイ酸含量を測定した。

水田集水域の灌漑水による自然のケイ酸供給システム調査を目的に、インドネシアスマトラ島ソロック市・ディバワ湖からシンカラ湖の間に位置する水田流域において、2013 年 10 月から 2014 年 12 月にかけておおそ月 1 度の頻度で河川水および田面水をサンプリングし、デジタルパックテストにより Si、Ca、Mg、K、Na 濃度を測定した。流域の上流から下流にかけて本流と支流にサンプリングサイトを設け、時間変動のみならず空間的な変動の把握も試みた。

4. 研究成果

(1) 熱帯地域水田の可給態ケイ酸レベル

土壌中可給態ケイ酸含量を IIRRI および Sumida の示す基準と比較すると、火山灰母材由来の土壌の多い West Java では欠乏レベルの基準を上回っていたが、堆積岩由来の土壌の Lampung では下回っていた(図 1)。現地農家は いもち病に耐性のあるイネ品種(Ciherang)を選択して栽培していたが、比較的降水量の多い West Java 州では可給態ケイ酸含量レベルが IIRRI および Sumida と超えていてもいもち病害の被害が大きい地域・圃場があり、そこでは土壌中の可給態ケイ酸含量ではなくイネのケイ酸含量といもち病罹患率に関係が認められ、イネのケイ酸吸収の促進も重要な要因であることが示された。



ナイジェリアの新規水田の土壌は概して砂質で、有機物含量も肥沃度も低い。西部の熱帯林地帯の Akure は例外的に肥沃度は高かった。可給態ケイ酸含量に関しては、熱帯アジア地域の平均値 $237\text{mg SiO}_2\cdot\text{kg}^{-1}$ (Kyuma 2001) の対して平均で $131\text{mg SiO}_2\cdot\text{kg}^{-1}$ と低く、調査地点の 50% が IIRRI の基準 $86\text{mg SiO}_2\cdot\text{kg}^{-1}$ を下回っていた。新規の水田であり、今後集約的な稲作を行うと可給態ケイ酸含量は減少することが予想される。稲の病虫害に対して現在のところ、鳥害に農民の関心が奪われておりまた調査報告もないため、被害について実態が把握できていないが、今後確実に病虫害対策は重要になる。また、今回調査した新規水田は農民レベルで開発された小規模な水田であり、水を安定的に供給できる灌漑システムが無い場合、水の利用効率の向上が重要であり、土壌中の可給態ケイ酸レベルの管理は米生産性の向上のために農民レベルで実施できる有用なオプションになる。

ガーナ、アシャンティ地方の水田集水域において、過去 10 年間の各土地利用における土壌肥沃度の変化を調べた結果、休耕地では肥沃土は維持されていたのに対して、水田では集水域内の他の土地利用、カカオ畑や畦を持たない掛け流しの伝統的稲作地と同様に、TC、TN、可給態 P の減少傾向が認められた。集約的な稲作を行ってきた水田でも、肥沃土の低下は認められたがその減少割合が緩慢であり、肥沃度は比較的高く維持されていた。本調査により、カカオの葉のケイ酸含量が高い事、そしてカカオ畑の表層土の可給態ケイ酸含量が高い事が示され、水田の可給態ケイ酸供給源として、地形連鎖を考慮した土地利用(カカオ畑から低地水田への表土侵食移動やリター採取供給ができる位置関係)ができれば、現地適応型の自然の可給態ケイ酸供給システムを構築できると期待される。地域の土地所有・利用制度が土地利用の改変の妨げになる事も予想されるが、カカオ生産は世界の熱帯地域に広がっており、他の地域にも適用できるシステムである。

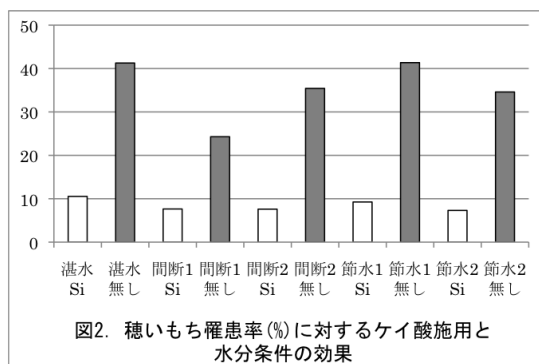
(2) ケイ酸施用効果の検証

ポット試験の結果、移植時にいもち病を接種したイネの葉いもち病の罹患率(移植後 7 日で 70% 前後)はケイ酸施用の有無にかかわらず生

育と共に減少したが、移植後 45 日の罹患率はケイ酸施用区で有意に小さくなった。そして、収穫時の耐こび抵抗強度は比較的いもち病の罹患率が高かった処理区で、ケイ酸施用区(常時湛水)により強度が有意に大きくなった。移植時にいもち病を接種せず、健康に育てたイネの分けつ数はケイ酸施用により増加し、ケイ酸のイネ生育および強度向上への効果が確認された。

West Java 州の圃場試験において、ケイ酸施用がいもち病の発生(個体数およびいもち病の葉面での広がり)を低下させた。今回の試験では、コメ収量への有意な効果は認められなかったが、コメの品質には影響している可能性があり今後分析を行いたい。他に、興味深い結果として、葉面の気孔密度が約 1.5 倍程度増加した。葉の表皮細胞におけるシリカ層の形成が気孔外(クチクラ層)からの水蒸散を抑制してイネ体内の水分状態を改善し、より多くの気孔を形成する事につながった可能性を示した。

中央ジャワ州での試験では、収穫期の穂いもちの罹患率へのケイ酸施用の効果が顕著に認められた(図 2)。また、土壌水管理の違いがケイ酸施用の効果に影響しており、一般的に知られているようにイネは水吸収と共にケイ酸を吸収しており、イネの未利用可能度もケイ酸吸収に重要な環境要因である事が改めて示された。水の限られる地域では、今回試験した水管理方法、湛水はせず土壌中の飽和を維持する節水灌漑は湛水と同等の生育、いもち病抑制を示し、有効な方法である。



(3) ケイ酸供給方法の検討

ジャワ島を中心に現地で入手可能なケイ酸含有資材を探索し 34 種の資材を入手した。これらの賦存量については混合詳細に調べる必要があるが、各種抽出法により可給態ケイ酸を比較した結果、抽出方法により分析値は大きく異なり一般的な傾向として、植物など有機物系の資材はアルカリによる抽出で、鉄鋼スラグや石炭灰はクエン酸や塩酸抽出で選択的に Si が溶出した。これらの違いは、資材中のケイ酸の存在形態が関わっており、資材をケイ酸肥料として改質するための基礎データとなる。水田の可給態ケイ酸レベルの管理のために、イネわらやもみ殻の圃場への還元が考えられるが、イネわらはそのまま還元すると次の作期の苗生育に影響するため堆肥化後還元することが望まれる、このイネわら堆肥の可給態ケイ酸含量は抽出方法にもよるが、

籾殻に比べて 2-16 倍大きかった。水抽出では籾殻からほとんどケイ酸は溶出せず、ケイ酸供給効果は小さいと判断される。日本でケイ酸肥料として用いられる、鉄鋼スラグや石炭灰はインドネシアでも同様に利用できると考えられた。他に、葉中のケイ酸含量が高いカカオや竹の葉も、アルカリ抽出であれば鉄鋼スラグと同レベルのケイ酸が溶出し、適当な前処理により改質できればケイ酸資材として利用できることが期待できる。

有機肥料又は単離した微生物を添加した土壌でのケイ酸溶出量を測定した。その結果、有機肥料や単離した微生物を添加した土壌では、コントロールと比較してケイ酸溶出量が増加した。これらの結果より、微生物資材の投入による土壌でのケイ酸の可給化の可能性とそれによる病害発生の抑制が考えられた。

溶存態ケイ素の流域平均濃度は 19mg/L(4 - 68mg/L)であった。流域上流部のディバワ湖において、湖への流入小水路と出口の濃度は、35.8mg/L と 6.2mg/L であり、高濃度の溶存態ケイ素を含む水が湖沼に流れ込んだ後、湖沼内での消費・沈降や希釈等の作用により安定した低濃度の状態で流域下流部に向けて流下を始めることが把握された。2km 程度下流に位置する河川本線では、湖出口に比べ高い濃度(10-25 mg/L)を示した。加えて近隣の農地を流れる小水路では平均値 23.4mg/L が観測され、かつ変動幅も小さかった。このことから、上流の湖以外に溶存態ケイ素を供給するポイントが存在する事が示唆され、調査を進めた結果、タラン山中腹の温泉の源泉で平均値 62.1mg/L と高濃度の水が湧出していることが把握された。そして、本流域ではタラン山を起源とする地下水から表流水へケイ素が供給されていると考えられた。

また、農地を流下する過程で供給される可能性が示唆された。流域上・中・下流域における田面水の溶存態ケイ素の分布を調査した結果、上流部水田の田面水は濃度区間 5 - 10mg/L で、下流部では 15 - 20mg/L で最も頻度が高いことが把握された。つまり上流から下流にかけて流下する過程で河川水に地下水等からケイ素が供給され、それが灌漑水として水田に供給されることによって田面へケイ素が供給されていることが示唆された。季節変動があり、乾季の雨が最も少ない 6 月から 7 月にかけて濃度が上昇し雨季に減少する傾向が認められ、これは田面土壌と田面水との接触時間の長さや雨季の降水による希釈等が要因と考えられる。これまでの調査から、流域内の溶存態ケイ素濃度の変動傾向や空間分布はおおよそ把握されたが、水田土壌から供給されるケイ素量と灌漑水から供給される量の割合や、流域内ケイ素濃度の高低と稲の生育状況や耐病虫害等に関する情報は得られておらず、今後の課題である。

< 引用文献 >

高橋英一、作物にとってケイ酸とは何か、農文協、東京、2007、pp.189

Darmawan 他, Effect of long-term intensive rice cultivation on the available silica content of sawah soils: Java Island, Indonesia, Soil Sci. Plant Nutr., 52, 2006, 745-753

Husnain 他, Dissolved silica dynamics and phytoplankton population in Citarum Watershed, Indonesia, Journal of Food, Agriculture & Environment, 7(3&4), 2009, 655-661

Kyuma, K., Paddy Soil Science, Kyoto Univ. Press, Kyoto, 2004, pp. 280

5. 主な発表論文等

[雑誌論文](計 1 件)

Marques Fong J. D., Masunaga T., Sato K. Assessment of the influence of water management on yield component and morphological behavior of rice at post-heading stage. Paddy and Water Environment, 査読有, 2015, DOI 10.1007/s10333-015-0491-1

[学会発表](計 12 件)

増永二之 他, ガーナ・アシャンティ地方に導入された水田“Sawah”における土壌特性の変化, 日本土壌肥料学会 2012 年度大会, 鳥取大学(鳥取), 2012 年 9 月 5 日

Alarima C.I., 増永二之 他, Silica Availability in Lowland Soils in Nigeria and Ghana, 日本土壌肥料学会 2012 年度大会, 鳥取大学(鳥取), 2012 年 9 月 5 日

Nguyen T. Q., 上野誠 他 *Biscogniauxia* 属菌を用いたイネいもち病の抑制について(2) 平成 25 年度日本植物病理学会関西支部会, 岡山大学(岡山), 2013 年 9 月 26 日

Masunaga T., K.Sato, 他 Foliar Fertilization to Improve Nutritious Value of Rice Grain. 11th International Conference of The East and Southeast Asia Federation of Soil Science Society (ESAFS). Bogor, Indonesia, 2013 年 10 月 22 日

Siregar A.F., Masunaga T. 他 Sawah Soil Properties In Relation To Blast Disease Infection And Si Availability At West Java And Lampung Provinces, Indonesia. 11th ESAFS. Bogor, Indonesia, 2013 年 10 月 22 日

Alarima C.I., Sato K., Masunaga T. 他 Micronutrient availability in sawah soils of inland valleys in Nigeria. 3rd Africa Rice Congress, Yaunde, Camerron, 2013 年 10 月 23 日

上野誠 他, *Biscogniauxia* 属菌を用いたイネいもち病の抑制について(3) 平成 26 年度日本植物病理学会大会, 札幌コンベンションセンター(北海道), 2014 年 6 月 3 日

Siregar A.F., Masunaga T. 他 Effect of Silica Application on Improving Rice Resistance to Blast Disease and Growth in West Java, Indonesia. 20th World Congress of Soil Science, Jeju, Korea, 2014 年 6 月 13 日

Nguyen T.Q., Ueno M. 他. Inhibitory effect of culture filtrates of fungi isolates from mushroom against *Magnaporthe oryzae*: The 3rd Korea-Japan Joint Symposium on Plant Pathology, Busan, Korea, 2014 年 10 月 23 日

Terao S., Ueno M. 他: Effect of autoclaved water extract from fruit body of hatakeshimeji mushroom on protection of rice against blast.: The 3rd Korea-Japan Joint Symposium on Plant Pathology, Busan, Korea 2014 年 10 月 23 日

Marques Fong J.D., Masunaga T., 他 Use of water management, foliar fertilizer and soil organic amendments as a way to increase the nutritive value of rice grain. 3rd International Rice Congress (IRC 2014), Bangkok, Thailand, 2014 年 10 月 28 日

増永二之: 熱帯アジア・アフリカ地域の稲作の安定化と拡大におけるケイ酸の役割. 第 28 回環境工学連合講演会, 日本学術会議講堂(東京), 2015 年 5 月 15 日

6. 研究組織

(1) 研究代表者

増永 二之 (MASUNAGA Tsugiyuki)
鳥根大学・生物資源科学部・教授
研究者番号: 1 0 3 2 5 0 4 5

(2) 研究分担者

宗村 広昭 (SOMURA Hiroaki)
鳥根大学・生物資源科学部・准教授
研究者番号: 9 0 4 0 3 4 4 3

上野 誠 (UENO Makoto)
鳥根大学・生物資源科学部・准教授
研究者番号: 0 0 4 0 3 4 6 0

佐藤 邦明 (SATO Kuniaki)
鳥根大学・生物資源科学部・助教
研究者番号: 6 0 5 3 3 2 8 9

(3) 連携研究者

(4) 研究協力者

Husnain
インドネシア土壌研究所・研究員
Alarima Cornelius Idowu
ナイジェリア, アベオクタ農業大学・講師
Marques Fong Juan Damian
キューバ国立稲研究所・研究員