

# 主論文の要約

論文題目 水田土壌におけるケイ酸の動態に関する研究

氏名 三原 千加子

ケイ素 (Si) は、イネ科植物にはケイ酸として乾重の 0.1~10%含まれており、水稲に対しては光合成速度，受光態勢，根の酸化力，食味，生物学的および非生物学的ストレス耐性の向上をもたらす有用元素と位置づけられている。水稲は土壌溶液中の Si を吸収し，その効果は吸収量が高いほど大きいとされている。水稲体の Si 含量を高く維持する上で，土壌中における水溶性 Si の給源，動態および植物を理解することが重要である。土壌溶液中には，鉱物の溶解，鉱物に吸着している水溶性 Si の脱着，有機物の分解によって遊離したポリケイ酸の溶解等によって Si が供給されるが，水田土壌を湛水し，酸化還元電位 (Eh) が低下すると Si 溶出量が増大したこと等から，還元によって可溶化する鉄 (Fe) 酸化物に吸着したケイ酸が水稲の主要な Si 源であろうと予想されてきた。そこで，本研究では，土壌の酸化還元に伴う Fe の形態変化と水溶性 Si の動態との関係，可給態 Si に対する易還元性 Fe の寄与，さらには溶存 Si の化学種と水稲の利用性との関係を明らかにすることを目的とした。

まず，水稲生育中後期に落水・湛水を繰り返す節水栽培に着目し，水管理による圃場水分の変動とそれに伴う Fe の酸化還元が土壌中の水溶性 Si の動態と水稲の Si 吸収量に及ぼす影響を圃場試験において調べた。千葉県九十九里の農家 2 圃場に節水区 (中干し以降間断灌漑) と対照区 (中干し以降も湛水) を用意し，3 年間にわたって，作付け期間中の酸化還元電位 (Eh)，土壌溶液中の Fe 濃度，Si 濃度の変動および水稲の Si 吸収量を比較した。併せて，土壌からの Si 溶出速度 (逐次水抽出法) と積算温度に基づく土壌からの推定積算 Si 供給量，灌漑水からの Si 供給量の推定を行った。その結果，土壌溶液中の Fe 濃度の変動が土壌 Eh の変動と対応し，節水区と対照区とで明らかに異なっていたのに対し，Si 濃度には Eh や Fe 濃度の変動との関連は認められず，水稲生育後半には両区とも低い濃度で推移した。また，土壌からの推定 Si 供給量，水稲による Si 吸収量には処理区間で差は認められなかった。そこで，水稲による Si 吸収がない室内土壌培養試験を行って，落水・湛水に伴う溶存 Si 濃度の変化を調べたところ，土壌溶液中の Fe 濃度とともに，Si 濃度も落水によって減少し，再湛水によ

って増大する傾向が認められた。しかしながら、室内土壌培養試験の結果から、圃場において節水管理により土壌溶液から失われた Si 量を算出したところ、水稻が吸収した Si 量の 1%以下であった。また、節水によって減少した灌漑水からの Si 供給量も、水稻による Si 吸収量の 2~5%と推定されたことから、節水栽培は水稻への Si 供給に有意な差をもたらすには至らなかったと結論した。しかしながら、九十九里土壌は可給態 Si 含量、易還元性非晶質 Fe 含量がともに低かったことから、土壌の化学性によって土壌溶液中の Si 濃度およびその挙動が異なる可能性が残された。

次に、土壌中の易還元性 Fe が土壌から水稻への Si 供給量に及ぼす影響を明らかにするために、千葉県内水田 13 圃場における土壌中の可給態 Si 含量と非晶質 Fe、非晶質 Al およびそれらと共抽出される Si ( $Si_0$ ) の含量、水稻茎葉・穂中の Si 量との関係を解析するとともに、可給態 Si 含量、非晶質 Fe 含量が大きく異なる 3 種の土壌を選抜して室内土壌培養実験を行った。併せて濃度の異なるメタケイ酸溶液と  $Fe^{2+}$  溶液との混合試験により、 $Fe^{2+}$  の酸化が溶存 Si 濃度に与える影響を解析した。供試した 13 土壌について逐次水抽出法を用いて測定した可給態 Si 含量は、水稻茎葉部、穂部の Si 含量および単位面積あたりの水稻による Si 吸収量との間にそれぞれ正の相関を示し、水稻の主要な Si 源となっていることが示された。しかしながら、可給態 Si 含量と非晶質 Fe、 $Si_0$  含量との間には相関は認められず、複数の土壌で非晶質 Fe に吸着した Si 以外に主要な Si 源が存在すること、また、 $Si_0$  量は非晶質 Al 含量の影響を強く受けていることが示唆された。

室内土壌培養試験における間断湛水处理では、落水の際に土壌溶液中の Fe 濃度が常に 83~96%減少したのに対し、Si 濃度の減少率は 22%以下であり、Si 濃度  $10 \text{ mg L}^{-1}$  以下の土壌では減少は観察されなかった。さらに、減少が認められた土壌においても湛水・落水を繰り返すと、減少率は有意に低下した。培養試験で観察された Si、Fe 濃度の範囲内で行ったメタケイ酸溶液と  $Fe^{2+}$  溶液との混合試験では、液相中の Si 濃度と単位 Fe 沈殿量あたりの Si 沈殿量との関係は、Frenundlich 式を用いて表すことができた。しかしながら、得られた式から推定した土壌培養試験における Si 沈殿率 (24~97%) は実際の沈殿率を上回った。また、間断湛水处理における Si 濃度は、再湛水後、Fe の再還元・可溶化よりも早く常時湛水处理とほぼ同じ濃度まで増大する傾向が認められた。したがって、土壌溶液中の Fe は落水時に溶存 Si の一部としか反応しない一方、溶存 Si 濃度が低下すると溶解平衡あるいは吸着平衡が移動して土壌から Si が溶出することで、土壌溶液中の Si 量の変動が抑制され、その結果、圃場試験においても節水区と対照区との間で水稻の Si 吸収量に差がなかったと推察された。

一般に土壌や灌漑水からの水稻へのケイ酸供給量は、溶存ケイ酸のほとんどが  $Si(OH)_4^0$  であることを前提に Si 濃度として評価される。しかしながら、pH が中性付近で Si 濃度が低い天然水中に含まれる溶存ケイ酸の化学種を分析した例はほとんどない。そこで、溶存ケイ酸種の分析手法としてキャピラリー電気泳動質量分析 (CE-MS) の利用を検討した。まず、Si 濃度が異なるシリカゲル溶液を用いて、CE-MS で検出される 7 種のケイ酸由来ピークの面積の和が ICP 発光分析で定量した Si 濃度と比例する

ことを確認し、また、異なる比率で混合した  $^{29}\text{Si}$  および  $^{28}\text{S}$  シリカゲル溶液を用いて、主要な化学種について  $^{29}\text{Si}$  ケイ酸と  $^{28}\text{S}$  ケイ酸のピーク面積比が溶液混合比を反映することを明らかにした。次いで、天然水の例として、青森県十和田および福井県勝山の 10 河川から採取した集水域の土壌群（黒ボク土、褐色森林土）および広葉樹林/針葉樹林の分布（針葉樹林占有率 0~92%）が異なる河川水中のケイ酸組成を解析した。その結果、全試料において単量体とともに 2 量体が、また、9 試料、7 試料から環状 4 量体、直鎖 5 量体がそれぞれ検出された。単量体の存在比は溶存ケイ酸の 21~67% に留まり、2 量体（27~50%）、環状 4 量体（0~27%）も重要な形態であることが示唆された。河川流域の森林植生とケイ酸組成との関連は認められなかったが、集水域の土壌群に関しては、黒ボク土の方が褐色森林土よりも溶存 Si 濃度が高く、多量体の存在比も大きいことが示された。これらの結果より、河川からの灌漑や水田土壌からの溶出によって水稲に供給される Si 量を評価する際に、特に黒ボク土が卓越する地域では、溶存ケイ酸の多くが多量体である可能性を考慮する必要があることが示唆された。

以上のように、本研究を通して、水田において土壌水分の変動は飽和容水量を維持する限り Si 供給量には影響しない（節水栽培が適用できる）こと、これまで可給態 Si の主要担体とされてきた易還元性 Fe の量および動態は水稲が利用できる Si 量を支配する重要な因子ではないことが明らかになった。また、河川水中の溶存ケイ酸には、一般的に単量体以外に多量体も多く存在することを初めて示し、水稲への Si 供給を評価する上でケイ酸多量体の利用性を考慮する必要があることを示唆した。