

技術論文

製鋼スラグ肥料による植物への養分供給および土壌化学性の改善

Effects of Steelmaking Slag Fertilizer on Plant Nutrient Supply and Soil Chemical Improvement

小泉匠平*
Shohei KOIZUMI

抄 録

製鋼スラグは植物の生育に有用な SiO_2 , CaO , MgO , Fe , Mn , P_2O_5 を含み、水稻の高温障害緩和や酸性土壌改良、微量元素供給が可能な多機能な肥料である。特に、 SiO_2 含有量は高炉スラグより低いが、製鋼スラグに含まれる Ca_2SiO_4 の高い溶解性により、土壌中での SiO_2 溶出量は上回ることを実験と解析で示した。土壌 pH を 5.4 ~ 7.6 に調整した栽培試験では、10 ~ 29% の増収、植物体内の P・Mg・Fe・Mn 濃度上昇、土壌中の可給態 P_2O_5 や交換性 CaO ・ MgO の増加が確認され、高 pH 下で懸念される Fe・Mn 欠乏や Ca 過剰による Mg 吸収阻害も見られなかった。以上より、製鋼スラグ肥料は気候変動下での水稻の収量・品質向上や、土壌病害の軽減、化学肥料削減に資する有望な肥料であるといえる。

Abstract

Steelmaking slag contains plant-beneficial components such as SiO_2 , CaO , MgO , Fe , Mn , and P_2O_5 , and functions as a multifunctional fertilizer capable of mitigating heat stress in rice, improving acidic soils, and supplying micronutrients. Although its SiO_2 content is lower than that of blast furnace slag, dissolution experiments and thermodynamic analysis demonstrated that the higher solubility of Ca_2SiO_4 in steelmaking slag results in greater SiO_2 release under soil conditions. In a cultivation experiment in which soil pH was adjusted to 5.4–7.6 by varying the application rate, steelmaking slag increased crop yield by 10–29%, enhanced plant tissue concentrations of P, Mg, Fe, and Mn, and increased available soil P_2O_5 as well as exchangeable CaO and MgO . Notably, neither Fe/Mn deficiency nor Mg uptake inhibition caused by excess Ca concerns typically associated with high-pH soils was observed. These results indicate that steelmaking slag is a promising fertilizer that can improve rice yield and quality, reduce soil borne diseases, and decrease chemical fertilizer use under climate change conditions.

1. 緒 言

製鉄プロセスで発生する鉄鋼スラグは高炉スラグと製鋼スラグの2種類に大別される。高炉スラグは、高炉で鉄鉱石を還元して熔銑を得る際に発生するスラグである。製鋼スラグは熔銑中の C や Si, Mn, P, S など除去する工程で発生するスラグの総称であり、様々な種類が存在するが、最も代表的なものは、転炉で酸素と石灰により熔銑を脱炭して鋼とする際に発生する転炉スラグである。高炉スラグと製鋼スラグの組成例を表1に示す。これら鉄鋼スラグは様々な産業で利用されており、高炉スラグは主にセメント原料、製鋼スラグは道路路盤材や土木用途に用いられている。なお、電気炉から発生する電気炉スラグを製鋼スラグに含む場合があるが、本報告では製鋼スラグには含めない。

ところで、植物の生育には表2に示す17種類の元素が

表1 高炉スラグと製鋼スラグの代表的な組成¹⁾
Typical compositions of blast furnace slag and steelmaking slag¹⁾

	(mass%)						
	CaO	SiO ₂	MgO	MnO	T-Fe	Al ₂ O ₃	P ₂ O ₅
Blast furnace slag	41.7	33.8	7.4	0.3	0.4	13.4	0.1
Steelmaking slag	45.8	11	6.5	5.3	17.4	1.9	1.7

表2 植物の必須元素および有用元素
Essential and beneficial elements for plants

Essential elements	Macronutrients	C, H, O, N, P, K, Mg, Ca, S
	Micronutrients	Fe, Mn, B, Zn, Mo, Cu, Cl, Ni
Beneficial elements		Si, Na, I, Co, V, ...etc.

Note: Elements contained in steel slag are indicated in red.

* 先端技術研究所 環境基盤研究部 主任研究員 博士(工学) 千葉県富津市新富 20-1 〒293-8511

必要不可欠なことが知られており、この元素群を植物の必須元素と呼ぶ²⁾。必須元素は必要量により分類され、植物体を構成する有機物や細胞壁、代謝に必要な物質の合成に大量に使われるものを多量必須元素と呼ぶ。一方で、酵素の補因子として代謝反応を触媒し、必要量は少ないが欠かせないものを微量必須元素と呼ぶ。その他に、必須元素ではないものの、特定の作物に対して生育を強く改善させる“有用元素”も存在する。たとえば、イネ科植物はケイ素を積極的に吸収して生育に活用することが知られている³⁾。

我が国で最も重要な作物である水稲は、特にケイ酸要求量の多い作物であることから、ケイ酸を豊富に含む鉄鋼スラグは主に水稲向けの肥料として活用されてきた。鉄鋼スラグ協会の統計によると、2024年度は高炉スラグ約9.8万t、製鋼スラグ約8.8万tが肥料および土壌改良用途で使用されている⁴⁾。

また、近年は、水田での利用に限らず、畑作や草地の酸性土壌改良を目的とした肥料としても活用されている。土壌のpHは作物の生育と密接な関係があり、一般的にはpH6.0~6.5の弱酸性土壌が適切とされる⁵⁾。土壌は降雨などで塩基性成分が流出していくことで次第に酸性が強まるため、定期的にCaOやMgOなど塩基性成分を補充する必要がある。例として、図1に土壌pH4.8の黒ボク土と、黒ボク土に粉状の製鋼スラグ肥料“ミネカル”を土壌100gあたり2.1g加え、pH6.5に矯正した土壌で栽培したコマツナを示す。このように、酸性化した土壌のpHを適切な範囲に調整することで、生育は顕著に改善する。酸性土壌改良には炭酸カルシウムが使用されることが多いが、製鋼スラグ肥料も同様の効果を持ち、さらに炭酸カルシウムよりも酸性土壌改良効果の持続性が高いことや、塩基性成分以外の栄養素も供給できることから、酸性土壌改良材としても注目を集めている⁶⁾。

高炉スラグと製鋼スラグ、どちらも水稲に有用なケイ酸や、酸性土壌改良効果を示すCaOとMgOを豊富に含むが、



図1 土壌pHがコマツナの生育に及ぼす影響(播種後28日目)
左：土壌＋製鋼スラグ肥料 (pH6.5) 右：土壌のみ (pH4.8)
Effect of soil pH on Komatsuna growth (28 days after seeding)
Left: soil+steelmaking slag fertilizer (pH 6.5); Right: soil only (pH 4.8)

製鋼スラグには加えて必須元素としてP、Fe、Mnも含むことから、より肥料原料として有用であると考えられる。本報告では、製鋼スラグ肥料に注目し、近年注目されている用途を紹介し、さらに具体的な検討事例として、製鋼スラグ肥料のケイ酸供給能力に関する化学的な検討と、製鋼スラグ肥料を多量に施用した場合の植物や土壌への影響について報告する。

2. 近年の製鋼スラグ肥料に対する期待効果

近年、日本の農業を取り巻く環境は大きく変化している。第一に、温暖化の進行による作物の品質低下や収量不安定化が顕著になっている点である。2023年の記録的な猛暑は水稲の収量・品質を大きく低下させ⁷⁾、これによる米価の高騰は社会問題にも発展し、2025年度も米価は高止まりしている⁸⁾。

第二に、持続的な食料供給体制の構築に向けた取り組みの推進である。農業分野においても、安定した食料生産が可能な環境を維持するため、上記の地球温暖化対策や、生物多様性の保全が強く求められている。また、持続的な食料生産においては経済的な課題も発生している。2021年から2022年にかけて国際需給の変動に伴う肥料価格高騰が発生し⁹⁾、肥料原料の多くを海外からの輸入に依存する我が国は大きな影響を受け、現在も供給不安にさらされている。

このような背景を踏まえ、農林水産省は2050年に向けて“みどりの食料システム戦略”を掲げ、農林水産分野に関するCO₂のゼロエミッション化や、化学農薬使用量の50%低減、国内の未利用資源の活用による化学肥料使用量30%削減などの達成を目指している¹⁰⁾。

このような課題の解決が模索される中、製鋼スラグ肥料は多方面から貢献することが可能である。製鋼スラグ肥料から供給されるケイ酸は水稲の高温障害を緩和し、収量や品質を向上させる効果¹¹⁾、FeとMnは水田土壌からのメタンガス発生抑制効果が報告されている¹²⁾。また、製鋼スラグ肥料を用いて、土壌pHを7.5に矯正することで複数の土壌病害の発生を抑制する方法が見出されており¹³⁾、土壌病害の発生しにくい環境を整えることで化学農薬の使用量削減に貢献可能である。さらに、化学肥料削減についても、製鋼スラグ肥料にはリン酸が2%程度含まれるため、上記のケイ酸供給効果や酸性土壌改良効果に付随して土壌へリン酸が供給されるため、使用するリン酸肥料の一部を代替することが可能である。

以下、本章ではケイ酸供給による水稲の高温障害の軽減と、土壌pHの矯正による土壌病害の抑制事例について紹介する。なお、FeやMnによる水田土壌からのメタンガス発生量削減効果は、既報¹²⁾にて詳細を報告している。リン酸供給効果については、次章で示す製鋼スラグ肥料を用いた栽培試験にて効果を示す。

2.1 ケイ酸供給による水稻の高温障害の軽減

ケイ酸は鉄鋼スラグを構成する主要な成分であり、水稻の生育において重要な役割を持つ肥料成分である。水稻は土壌中からケイ酸を積極的に吸収する特性を持ち、健全な葉身中のケイ酸含有量は乾物重量あたり約 15% に達することが知られている¹⁴⁾。吸収されたケイ酸は葉や茎の表面に集積し、緻密な珪化細胞層を形成することで、水稻の生育に多面的な効果をもたらす。代表的な効果として、前述の通り高温障害を軽減する効果に加え、茎の機械的強度の向上による倒伏防止、葉の直立性改善による受光体勢の確保、病原菌侵入の物理的阻害などが知られている。製鋼スラグ肥料により珪化細胞の形成が促進され、それにより病原菌の侵入が抑制されている例を図 2 に示す。

このようにケイ酸は水稻に対し多面的な効果を持つが、近年は登熟期の高温化により、高温障害による品質・収量の低下が顕在化していることから、鉄鋼スラグ肥料に代表されるケイ酸質肥料への注目が高まっている。

ケイ酸による高温障害緩和のメカニズムの概要を図 3 に示す。一般的に、高温環境では、稲は水分損失を抑えるために葉の表面にある気孔を閉じやすくなる。気孔が閉じられると光合成が抑制され、光合成の産物である糖分の穂への供給が不足し、未熟粒の増加や一粒あたりのサイズの低下が起こる。一方、ケイ酸が十分供給されている場合、葉の表面に形成される珪化細胞の層が緻密になり、表面からの余分な水分蒸発が抑えられる。その結果、水分が保持され、高温条件下でも気孔を閉じにくくなる。これは、光合成機能の低下を防ぎ、穂に必要な栄養が安定して供給されることにつながり、結果として、精米時に割れて歩留まり低下の原因となる未熟粒の減少や、食味に影響する千粒重(千粒あたりの重量)の向上が得られ、収量・品質が維持される¹⁶⁾。

製鋼スラグ由来のケイ酸供給が、高温ストレス下における生理機能維持に大きく寄与することを示す具体的な事例として、藤井らによる報告が挙げられる。報告によると、転炉スラグ肥料(200kg/10a)施用により、無処理区と比較して最大 47% の光合成量増加と 8% の収量増加が示されている¹⁶⁾。

このように水稻の生育に対し優れた効果を発揮するケイ酸は高炉スラグでは約 34%、製鋼スラグでは一般に 10~20% 程度含まれている。ケイ酸含有量そのものは高炉スラグの方が高いため、これまで主として高炉スラグを原料としたケイ酸質肥料(いわゆる“ケイカル”)がケイ酸供給源として利用されてきた。しかしながら、土壌環境を模擬した中性~弱酸性の条件下では、製鋼スラグの方が高炉スラグよりも高いケイ酸溶出量を示すことが近年明らかにされている¹⁷⁾。このケイ酸供給に関しては、次章(3章)で熱力学的観点から詳述する。

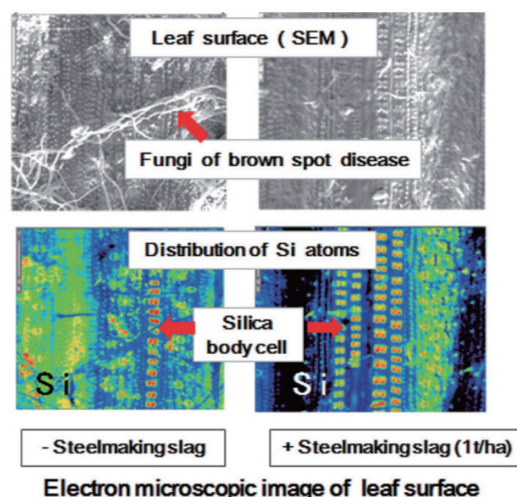


図 2 けい酸肥料施用による珪化細胞の形成と病原菌(ゴマ剥がれ病)の抑制¹⁵⁾

Formation of silica body cells on rice plant leaf by silicate fertilizer and suppression of brown spot disease¹⁵⁾

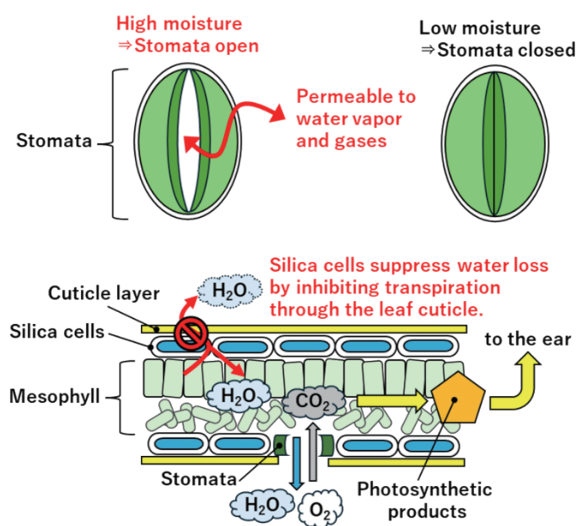


図 3 ケイ酸による水稻の高温障害軽減メカニズム¹⁶⁾
Mechanism of heat stress alleviation in rice by silica¹⁶⁾

2.2 製鋼スラグ肥料を用いた土壌 pH の矯正による土壌病害軽減効果

作物に感染し、収量や品質を低下させる土壌病害の被害を軽減するためには、土壌を病原菌が活動しにくい状態に保ち、さらに植物の状態を健全にすることで病気への抵抗性を高める予防的な措置が重要である。その代表的な事例として、転炉スラグを土壌に施用し、土壌 pH を 7.5 以上に調整することでアブラナ科根こぶ病の発生が大きく抑制されることが報告されている¹³⁾。さらに、ホウレンソウ、レタス、イチゴなどで発生するフザリウム属菌による土壌病害でも被害軽減が確認されている¹⁸⁾。

ただし、土壌病害効果が期待される土壌 pH 7.5 は、図 4 に示すトルオーグ図(帯の太さで土壌 pH と養分の可給性の関係を定性的に示した図)より、土壌中の Fe や Mn、ホウ素(B)の可給性が低下して欠乏症状が発現しやすい領

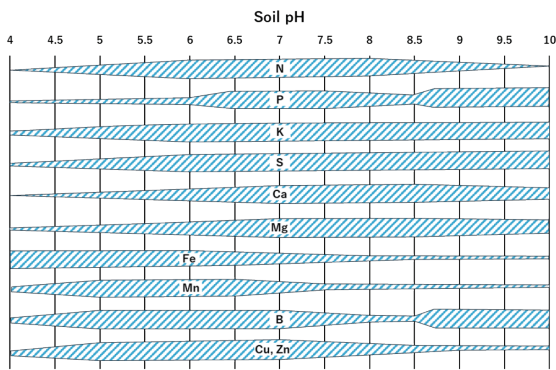


図4 土壌 pH と養分の可給性の関係 (Hartemink and Barrow (2023) を参考に作成 (原典: Truog)¹⁹⁾ Relationship between soil pH and nutrient availability (Adapted from Hartemink and Barrow (2023), originally based on the Truog diagram.)¹⁹⁾

域であり、一般的には推奨されない範囲である¹⁹⁾。実際に、pH 矯正に広く用いられる炭酸カルシウムや苦土石灰で土壌 pH をこの領域まで上昇させた場合、欠乏症状によって生育が停滞することが指摘されている⁹⁾。

一方で、製鋼スラグ肥料を用いて同じく土壌 pH7.5 に矯正した場合、顕著な生理障害が生じないことが複数の研究で確認されている^{6, 13, 18)}。これは製鋼スラグ肥料が酸性土壌改良効果を示す CaO や MgO に加えて、高 pH の領域で欠乏症状を起こしやすい Fe や Mn を豊富に含むためだと考えられている。このように、製鋼スラグ肥料の優れた点は、高 pH による病害抑制効果と微量元素不足の回避を両立できる点にある。

さらに、製鋼スラグ肥料は炭酸カルシウムに比べて pH の維持期間が長いことが特徴であり、施用後 10 年以上にわたり高い pH を保持した事例も報告されている¹³⁾。この持続性は、長期的に土壌病害の発生を抑制できることを意味し、省力化にも寄与する。

一方で、製鋼スラグ肥料に含まれる Fe, Mn, Ca, Mg, P などの成分が、上記のように土壌 pH7.5 を目標に多量施用した場合、土壌中の利用可能量や植物体への吸収量にどのように影響するかについては、個々の成分に関する報告はあるものの、体系的に比較・評価した研究は限られている。そこで本研究ではこの点に着目し、次章以降で栽培試験結果として詳細に検討する。

3. ケイ酸供給源としての製鋼スラグ肥料の優位性

鉄鋼スラグに含まれるケイ酸含有量は表 1 に示す通りであり、ケイ酸含有量の高い高炉スラグを原料とした“ケイカル”がケイ酸質肥料の主流であった。しかしながら、近年の研究では、実際の環境において製鋼スラグの方が高炉スラグよりも高いケイ酸溶出量を示すことが報告されている¹⁷⁾。さらに、製鋼スラグには Fe, Mn, リン酸等、高炉スラグにはほとんど含まれない複数の有用成分が共存するこ

とから、肥料原料としてのポテンシャルは高炉スラグより高いと考えられる。本章では、製鋼スラグ肥料の利用推進に向け、溶出試験および構成鉱物相の熱力学的性質に基づき、製鋼スラグ肥料のケイ酸供給能力を高炉スラグ肥料と比較し、その優位性を定量的に評価する。

3.1 対象としたスラグ肥料

本研究では、以下の 4 種類のスラグを対象とした。

- 高炉水砕スラグ：現在最も一般的な高炉スラグ肥料であり、市販の“ケイカル”の主原料である。
- 高炉徐冷スラグ：水砕設備普及以前に肥料として広く利用されていたが、現在は利用例が少ない。
- 溶銑予備処理スラグ：“農力アップ”（産業振興(株)）として販売されている。
- 転炉スラグ：多くの製鉄所で発生し、“ミネカル”（テツゲン(株)、産業振興）“てんろ石灰”“ミネラル G”（アサヒミネラル工業(株)）“珪鉄”“含鉄肥料”（清新産業(株)）など、複数の銘柄として市販されている。

3.2 高炉スラグ肥料と製鋼スラグ肥料のケイ酸溶出特性比較

図 5 に Ito らによる水-弱酸性陽イオン交換樹脂法を用いた溶出試験結果を示す¹⁷⁾。同手法は、溶液中に弱酸性陽イオン交換樹脂を添加することで、溶出中の pH を土壌環境に近い pH6 ~ 7 に維持できる点に特徴があり、得られるケイ酸溶出量は水稻のケイ酸吸収量と高い相関を示すことが知られている^{20, 21)}。

溶出量の大小関係は図 5 に示す通り、“溶銑予備処理スラグ > 高炉徐冷スラグ > 転炉スラグ > 高炉水砕スラグ”である。

また、表 3 に、各スラグ肥料のケイ酸含有量、陽イオン交換樹脂法によるケイ酸溶出量、前記ケイ酸含有量と溶出

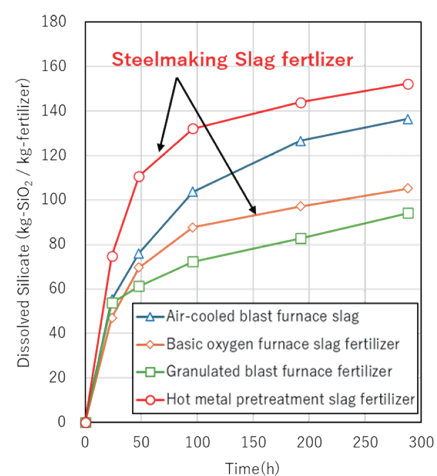


図5 陽イオン交換樹脂法によるケイ酸溶出量¹⁷⁾ Available silicate (SiO_2) by extraction method using cation exchange resin¹⁷⁾

表3 各スラグ肥料のケイ酸溶出率の比較¹⁷⁾
Comparison of efficacy of silicon (Si) elution from slag fertilizers¹⁷⁾

		Dissolved SiO ₂ at 288h A (kg kg ⁻¹ fertilizer)	SiO ₂ content B (kg kg ⁻¹ fertilizer)	Efficacy of Si elution A/B
Blast furnace slag	Granulated blast furnace slag fertilizer	0.094	0.34	0.28
	Air-cooled blast furnace slag	0.137	0.34	0.4
Steelmaking slag	Hot metal pretreatment slag fertilizer	0.152	0.23	0.66
	Basic oxygen furnace slag fertilizer	0.105	0.13	0.81

量から計算されるケイ酸溶出率を示した。表3より、2種類の製鋼スラグ肥料が高いケイ酸溶出率を示し、製鋼スラグ肥料中のケイ酸がより溶出しやすい状態にあることが示唆されている。

3.3 ケイ酸の存在形態がケイ酸供給能力に及ぼす影響の熱力学的検討

表4にXRDにより同定された各スラグの鉱物相を示す。高炉水砕スラグは溶融状態から急冷凝固されるため、CaO-MgO-Al₂O₃-SiO₂系の非晶質である。

表4に示す製鋼スラグ中の鉱物相の中で、特にCa₂SiO₄ (2CaO·SiO₂)は他の鉱物が溶解しないpH3~5の弱酸性溶

表4 XRDによるスラグ肥料の鉱物相解析結果¹⁷⁾
Mineralogical phases of slag fertilizer identified by X-ray diffraction (XRD)¹⁷⁾

		Identified substances
Blast furnace slag	Granulated blast furnace slag fertilizer	Amorphous
	Air-cooled blast furnace slag	Ca ₂ Al ₂ SiO ₇ (gehlenite), Ca ₂ MgSi ₂ O ₇ (akermanite), Ca ₂ (Mg _{0.5} Al _{0.5})(Si _{1.5} Al _{0.5} O ₇) (melilite), Ca(SiO ₃) (wollastonite)
Steelmaking slag	Hot metal pretreatment slag fertilizer	Ca ₂ SiO ₄ (calcium silicate, larnite), Ca ₂ Al ₂ SiO ₇ (gehlenite), Ca ₂ MgSi ₂ O ₇ (akermanite), FeO (wustite)
	Basic oxygen furnace slag fertilizer	Ca ₂ SiO ₄ (calcium silicate, larnite), Ca ₂ Fe ₂ O ₅ (srebrodolskite), CaFeO ₂ (calcium iron oxide), Ca ₂ (Al,Fe ⁺³) ₂ O ₅ (brown millerite), FeO (wustite)

表5 スラグ肥料中ケイ酸含有鉱物相の溶解反応式および反応の平衡定数²³⁻²⁸⁾
Dissolution reactions and equilibrium constants (log₁₀K) of silica-containing mineral phases²³⁻²⁸⁾

Mineral phase	Chemical composition	Reaction equation	logK
Wollastonite	CaSiO ₃	CaSiO ₃ + 2H ⁺ + H ₂ O ⇌ Ca ⁺² + H ₄ SiO ₄	14.05
Gehlenite	Ca ₂ Al ₂ SiO ₇	Ca ₂ Al ₂ SiO ₇ + 10H ⁺ ⇌ 2Al ⁺³ + 2Ca ⁺² + H ₄ SiO ₄ + 3H ₂ O	55.24
Akermanite	Ca ₂ MgSi ₂ O ₇	Ca ₂ MgSi ₂ O ₇ + 6H ⁺ + H ₂ O ⇌ 2Ca ⁺² + Mg ⁺² + 2H ₄ SiO ₄	46.09
Larnite	Ca ₂ SiO ₄	Ca ₂ SiO ₄ + 4H ⁺ ⇌ 2Ca ⁺² + H ₄ SiO ₄	39.04
Melilite (amorphous)	(Ca ₂ Al ₂ SiO ₇) _{0.42} - (Ca ₂ MgSi ₂ O ₇) _{0.58}	(Ca ₂ Al ₂ SiO ₇) _{0.42} - (Ca ₂ MgSi ₂ O ₇) _{0.58} + 5.16H ⁺ + 1.84H ₂ O ⇌ 2Ca ⁺² + 0.58Mg ⁺² + 1.58H ₄ SiO ₄ + 0.84Al(OH) ₃	49.595

液中であっても溶解すること²²⁾や、水田土壌中に埋設した製鋼スラグ肥料では、その表面から優先的に消失することが報告されている¹⁷⁾ことから、製鋼スラグにおけるケイ酸供給能力を支える主要鉱物であると推察されている。

一方、高炉水砕スラグに含まれる非晶質相やCa₂Al₂SiO₇, Ca₂MgSi₂O₇の弱酸性~中性域における溶解性については十分な知見が得られておらず、実験値を用いたCa₂SiO₄との定量的比較は困難であった。

表5に、上記鉱物相の溶解反応式および平衡定数を示す。高炉水砕スラグを構成する非晶質相は、表1に示す高炉スラグのMgOとAl₂O₃含有量より、モル比Ca₂Al₂SiO₇:Ca₂MgSi₂O₇=0.42:0.58のMelilite (Akermanite-Gehlenite固溶体)であると仮定し、溶解反応の平衡定数はAkermanite, Gehleniteの値をもとに、BertndtとStearnsraによる固溶体の比率と平衡定数に関する研究²³⁾より求めた。また、弱酸性溶液中において、AlはAl(OH)₃の形態をとるため、溶出したAl⁺³はAl(OH)₃として沈殿するものと仮定した。析出するAl(OH)₃の溶解反応Al(OH)₃+3H⁺⇌Al⁺³+3H₂Oの平衡定数はlogK=10.58である²⁴⁾。

これらの熱力学データを基に、各鉱物が水溶液中で平衡に達した際のpHとケイ酸濃度の関係を計算し、図6に示した。なお、非晶質状のMeliliteであると仮定した高炉水砕スラグは、非晶質は結晶質よりも反応性が高いとの知見に基づき、平衡定数が10倍になると仮定した。さらに、本計算では、溶液中の金属イオンの活量係数を1とし、Al(OH)₃以外の析出物が生じないと仮定した。

図6の結果より、製鋼スラグに含まれるCa₂SiO₄は、他の鉱物相と比較して平衡時に数桁高いケイ酸濃度を示すことが示された。実際の土壌環境ではケイ酸濃度が高くなる

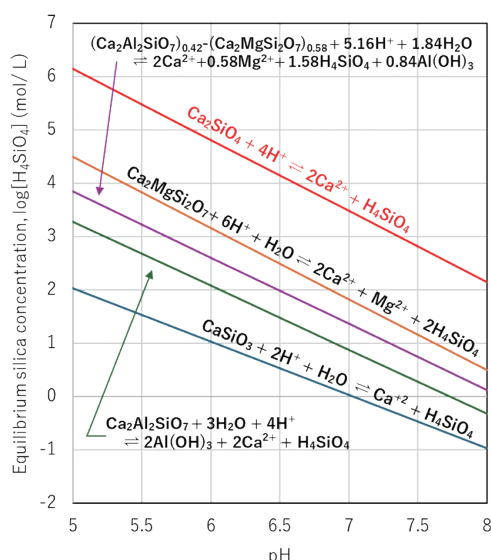


図6 各鉱物相の平衡時ケイ酸濃度とpHの関係
Relationship between equilibrium silicic acid concentration and pH for each mineral phase

とアモルファスシリカが析出するため、溶液中のケイ酸濃度が図6の計算結果程高くなることはないが、平衡濃度が高いということは、溶解反応の駆動力が大きく、溶解反応速度の速さに影響する。したがって、製鋼スラグ肥料のケイ酸供給能力が高炉スラグ肥料に対し優れているのは、スラグ中に他の鉱物相より非常に大きいケイ酸の平衡濃度をもつ Ca_2SiO_4 を有するためであるということが、熱力学的観点からも裏付けられた。

以上の結果から、製鋼スラグ肥料のケイ酸含有量は高炉スラグ肥料より低いですが、土壌環境条件下でのケイ酸溶出量は製鋼スラグ肥料の方が高い。これは、製鋼スラグに含まれる Ca_2SiO_4 が高い溶解性を示し、ケイ酸供給能力に大きく寄与しているためである。したがって、製鋼スラグ肥料は高炉スラグ肥料と比較して、実際の土壌中において高いケイ酸供給能力を発揮し得る優れたケイ酸質資材である。

4. 製鋼スラグ肥料多量施用時の土壌・植物への効果

前述の通り、製鋼スラグ肥料は土壌pHを7.5に矯正して、アブラナ科野菜の根こぶ病や、フザリウム属菌に由来する病害の被害を軽減することができ、その場合多量の製鋼スラグを土壌に施用することとなる。必要な施用量は土壌と製鋼スラグ肥料の特性により異なるが、10aあたり数tから十数tとなる例が多い。このように製鋼スラグ肥料を多量施用して土壌をpH7.5に矯正した場合、前述の通り高pHに起因してFeやMnの欠乏症状を呈する可能性がある。さらに、土壌中のCaとMgのバランスが好ましい範囲から外れ、拮抗作用と呼ばれる効果によりCa過剰によるMg欠乏症状を起こすことも考えられる。一方で生育に対しプラスに働く効果として、製鋼スラグ肥料中のリン酸が供給

されることが挙げられる。製鋼スラグ肥料を10aに対し1t加えた場合、表1に従うと土壌中に約17kgのリン酸が供給されることとなる。例として、根こぶ病を発病するキャベツの場合、リン酸施用量の目安は14~27kg/10aのため²⁹⁾、必要なリン酸量の約63~121%を供給することが可能である。

しかしながら、製鋼スラグ肥料に含まれるFe, Mn, Ca, Mg, Pなどの成分が、上記のように多量施用した場合、植物の生育および土壌に対してどのように影響するか、体系的に評価した研究が限られている。そこで、本検討では、製鋼スラグ肥料を土壌に対し、1~4g/土壌100g施用し、土壌pH5.4~7.6の範囲でコマツナを用いた栽培試験を実施し、収量や養分の吸収量、土壌中の可給態成分量の変化に対する影響を評価した。

4.1 栽培試験供試材

本検討では製鋼スラグ肥料として、粉状の転炉スラグ肥料を212 μ m以下に粉砕したものを用いた。また、土壌は市販の黒ボク土を用いた。

4.2 栽培試験手順

栽培試験は肥料の品質の確保等に関する法律に定められる植害試験法³⁰⁾に準拠して行った。手順の概要は次の通りである。ポット一つに対し、土壌400g, N, P_2O_5 , K_2O 各0.1g相当の肥料と、前記粉砕した製鋼スラグ肥料を土壌重量の1~4%混和し、コマツナの種を播種した。その後、一定期間栽培し、コマツナの地上部重量を測定した。なお各条件ともポットあたり4株のコマツナを栽培し、3反復実施した。

4.3 栽培結果

まず、各条件のコマツナの収量を図7、土壌pH、可給態リン酸、交換性CaO、交換性MgOを表6に示す。可給態リン酸とはpH3の硫酸アンモニウム溶液で抽出される植物が利用可能なリン酸量の指標である。また、交換性CaO

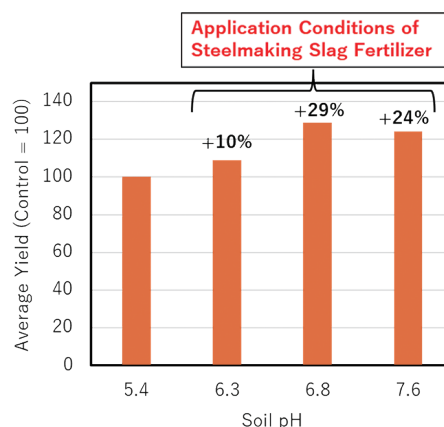


図7 土壌pHとコマツナ収量(乾燥重量)の関係
Relationship between soil pH and Komatsuna yield

表 6 製鋼スラグ肥料による土壌 pH および可給態成分への影響

Effects of steelmaking slag fertilizer on soil pH and plant-available nutrients

Slag fertilizer application rate (g/100 g soil)	Soil pH	Available P ₂ O ₅ in soil (mg/100 g soil)	Exchangeable CaO (mg/100 g soil)	Exchangeable MgO (mg/100 g soil)
0 (Control.)	5.4	0.14	167	20
1	6.3	0.45	548	35
2	6.8	0.66	834	42
4	7.6	1.07	1237	48

表 7 土壌 pH とコマツナの養分含有量の関係
Relationship between soil pH and nutrient content of Komatsuna

Slag fertilizer application rate (g/100 g soil)	Soil pH	Nutrient content (mg/kg)					
		K	P	Ca	Mg	Fe	Mn
0 (Control.)	5.4	77000	2200	41000	2600	150	290
1	6.3	73000	3100	38000	5000	290	420
2	6.8	66000	3600	37000	5200	350	490
4	7.6	66000	3300	39000	5300	730	500

および MgO は pH7 の 1N 酢酸アンモニウム溶液で抽出される。土壌中で植物が利用可能な Ca および Mg 含有量の指標である。また、コマツナの養分含有量を表 7 に示す。

4.4 製鋼スラグ肥料多量施用時の土壌・植物への影響に関する考察

図 7 に示すように、製鋼スラグ肥料の施用量が増加するにつれてコマツナの収量は向上した。対照区と比較して、pH6.3 で 10%、pH6.8 で 29%、pH7.6 で 24% の増収が確認された。これは、施用量増加に伴い土壌中の可給態リン酸および交換性 CaO・MgO が増加したことが一因と考えられる。

また、表 7 に示すように、コマツナに含まれる P、Mg、Fe、Mn 濃度はいずれも対照区より高く、特に Fe および Mn の吸収量は施用量の増加に伴い増加した。一般に高 pH 条件では Fe・Mn は可給性が低下し、欠乏を生じやすいとされるが、本試験ではそのような傾向は認められなかった。

さらに、土壌中の可給態リン酸量は施用量の増加に伴って明確に増加しており、コマツナの P 濃度も対照区より高く、製鋼スラグ肥料中のリン酸が植物に利用されたことが確認された。

交換性 CaO/MgO 比は、一般に当量比で 2.7～4.3 が適正範囲とされている⁹⁾。この理由は、CaO/MgO 比が適正範囲を大きく逸脱すると、拮抗作用により、過剰に存在する Ca あるいは Mg がもう一方の吸収を阻害するためである³⁾。図 8 に製鋼スラグ肥料の施用量と交換性 CaO と交換性 MgO の当量比を示す。対照区の当量比は 6 であり、製鋼スラグ肥料の施用によって当量比はさらに上昇し、4g/

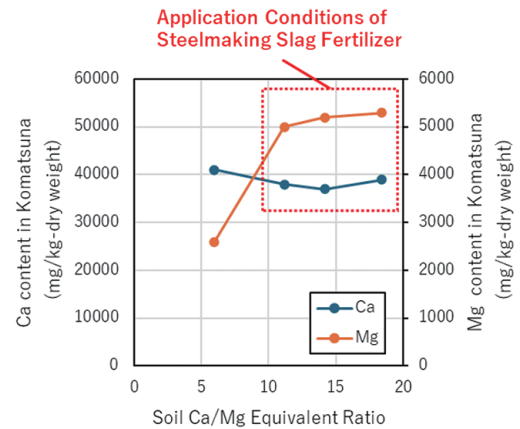


図 8 コマツナ中 Ca, Mg 含有量と土壌中 Ca/Mg 当量比の関係

Relationship between Ca and Mg contents in Komatsuna and the Ca/Mg equivalent ratio in soil

土壌 100g の条件では 18.5 に達した。一方で、前記当量比とコマツナ中の Ca、Mg の関係は図 8 に示す通り、植物体内の Mg 濃度も安定していた。

以上の結果より、懸念されていた Fe・Mn 欠乏や Ca 過剰に伴う Mg 吸収阻害は、本試験の条件下では確認されなかった。ただし、これらの元素吸収が阻害されなかった理由については、本試験で得られたデータからは明確に結論づけることはできないため、今後、詳細なメカニズムの検討が必要である。

5. 結 論

本報告では、製鋼スラグ肥料の特性と農業利用における有用性について、既往知見および本研究で実施した栽培試験に基づき総合的に評価した。製鋼スラグ肥料は、水稻に必要なケイ酸の供給源として高炉スラグを上回る溶出性を示し、特に製鋼スラグ特有の構成鉱物である Ca₂SiO₄ の高い溶解性が、製鋼スラグ肥料のケイ酸供給能力を支える主要因であることが確認された。また、CaO と MgO による酸性土壌の pH 矯正効果は長期間持続し、同時に Fe や Mn などの微量元素を供給できる点は、一般的な石灰資材には見られない特徴である。これらの性質は、根こぶ病やフザリウム病など複数の土壌病害を抑制する既報の知見とも整合し、製鋼スラグ肥料が土壌改善資材として高いポテンシャルを持つことを示している。

コマツナを用いた栽培試験では、土壌 pH5.4～7.6 の範囲において施用量の増加に伴う収量向上が確認され、対照区比で 10～29% の増収が得られた。土壌中の可給態リン酸や交換性 Ca・Mg も増加し、植物体内の主要養分濃度はいずれも対照区を上回り、高 pH 条件で懸念されていた Fe・Mn の欠乏、Ca 過剰による Mg 吸収阻害は認められず、最も pH の高い pH7.6 でも生育障害は生じなかった。これらの結果から、製鋼スラグ肥料はケイ酸供給、酸性土壌改良、微量元素供給といった複数の機能を兼ね備え、持続可能な

農業に寄与し得る資材であるといえる。

以上を踏まえ、製鋼スラグ肥料は水稻の高温障害や土壌病害の軽減、化学肥料依存の低減など、近年の農業が抱える課題への対策として有望な肥料であり、今後の利用拡大が見込まれる。

参考文献

- 1) 鐵鋼スラグ協会：鉄鋼スラグ製品の特性と有用性. 2015, p.4, https://www.slg.jp/cms/wp-content/themes/original/pdf/pamph-sustainability_2015.pdf, (参照 2026-02-26)
- 2) 村山登 ほか：作物栄養・肥科学. 第九版. 東京, 文英堂出版, 1997, p.24-34
- 3) 日本土壌肥料学会編：ケイ酸と作物生産. 初版. 博友社, 2002, p.40
- 4) 鐵鋼スラグ協会：鉄鋼スラグ統計年報 (2024 年度版). 2025, p.12-27, <https://www.slg.jp/cms/wp-content/themes/original/pdf/report-2024.pdf>, (参照 2026-02-26)
- 5) 農林水産省：地力増進法 - 地力増進法基本指針. 2008, https://www.maff.go.jp/j/seisan/kankyo/hozen_type/h_dozyo/pdf/chi4.pdf, (参照 2026-02-26)
- 6) 後藤逸男：植物防疫. 70 (4), 209 (2016)
- 7) 農林水産省：令和 5 年産米の農産物検査結果 (確定値). 2025, p.1, <https://www.maff.go.jp/j/seisan/syoryu/kensa/kome/attach/pdf/index-73.pdf>, (参照 2026-02-26)
- 8) 農林水産省：(参考) 相対取引価格の推移 (令和 3 年産～令和 7 年産). 2025, <https://www.maff.go.jp/j/seisan/keikaku/soukatu/attach/pdf/aitaikakaku-492.pdf>, (参照 2026-02-26)
- 9) 農林水産省：2022 年 7 月 食料安全保障月報 (第 13 号) 第 13 号特別分析トピック：我が国と世界の肥料をめぐる動向. 2022, https://www.maff.go.jp/j/zyukyu/jki/j_rep/monthly/attach/pdf/r4index-98.pdf, (参照 2026-02-26)
- 10) 農林水産省：みどりの食料システム戦略 (本体 全体版). 2023, p.6, <https://www.maff.go.jp/j/kanbo/kankyo/seisaku/midori/attach/pdf/index-10.pdf>, (参照 2026-02-26)
- 11) 藤井弘志：水稻の高温障害 リスク診断と対応技術. 山形, ファーム・フロンティア, 2020, p.54
- 12) 伊藤公夫：新日鉄住金技報. (399), 132 (2014)
- 13) 村上圭一 ほか：日本土壌肥料学雑誌. 75 (1), 53 (2004)
- 14) 三枝正彦：化学と生物. 38 (8), 514 (2000)
- 15) 伊藤公夫：新日鉄住金技報. (399), 148 (2014)
- 16) 藤井弘志：水稻の高温障害 リスク診断と対応技術. 山形, ファーム・フロンティア, 2020, p.40-41
- 17) Ito, K., Endoh, K., Shiratori, Y., Inubushi, K.: Soil Science and Plant Nutrition. 61, 835 (2015)
- 18) 転炉スラグによる土壌 pH 矯正を核とした土壌伝染性フザリウム病の被害軽減技術. 2015, https://www.naro.go.jp/publicity_report/publication/archive/files/tenro-slag-2.pdf, (参照 2026-02-26)
- 19) Hartemink, A. E., Barrow, N. J.: Plant and Soil. 486, 209 (2023)
- 20) 佐藤之信 ほか：日本土壌肥料学雑誌. 76 (5), 593 (2005)
- 21) 山下耕生 ほか：日本土壌肥料学雑誌. 84 (3), 166 (2013)
- 22) Gao, Xu, Maruoka, N., Kim, Sun-Joong, Ueda, S., Kitamura, S.: J. Sustain. Metall. 1, 304 (2015)
- 23) Alan, F. et al.: Chem. Educ. 50 (6), 415 (1973)
- 24) Bureau de Recherches Géologiques et Minières: Thermodemm Data consultation - Minerals – Gibbsite(am). <https://thermoddem.brgm.fr/species/gibbsiteam>, (参照 2026-02-26)
- 25) Bureau de Recherches Géologiques et Minières: Thermodemm Data consultation - Minerals – Wollastonite. <https://thermoddem.brgm.fr/species/wollastonite>, (参照 2026-02-26)
- 26) Bureau de Recherches Géologiques et Minières: Thermodemm Data consultation - Minerals – Larnite(alpha), <https://thermoddem.brgm.fr/species/larnitealpha>, (参照 2026-02-26)
- 27) Bureau de Recherches Géologiques et Minières: Thermodemm Data consultation - Minerals – Akermanite, <https://thermoddem.brgm.fr/species/akermanite>, (参照 2026-02-26)
- 28) Bureau de Recherches Géologiques et Minières: Thermodemm Data consultation - Minerals – Gehlenite, <https://thermoddem.brgm.fr/species/gehlenite>, (参照 2026-02-26)
- 29) 千葉県農林水産部環境農業推進課肥料・農薬班編：適主要作物等施肥基準 (平成 31 年 3 月改訂). 2019, p.220-225, https://www.pref.chiba.lg.jp/annou/documents/3103sehikijun_7yasai2.pdf, (参照 2026-02-26)
- 30) 独立行政法人農林水産消費安全技術センター (FAMIC)：植物に対する害に関する栽培試験の方法. 1984, http://www.famic.go.jp/ffis/fert/obj/shokugai/shokugai_01.pdf, (参照 2026-02-26)
- 31) 村山登 ほか：作物栄養・肥科学. 第九版. 東京, 文英堂出版, 1997, p.60



小泉匠平 Shohei KOIZUMI
先端技術研究所 環境基盤研究部
主任研究員 博士(工学)
千葉県富津市新富20-1 〒293-8511