

製鋼スラグの肥料用途

Steelmaking Slag for Fertilizer Usage

伊藤 公夫*
Kimio ITO

抄 録

高炉スラグも製鋼スラグも肥料原料として利用されており、肥料取締法で鉱さいけい酸質肥料、副産石灰肥料、鉱さいりん酸肥料および特殊肥料の含鉄物のいずれかに分類されている。高炉スラグの肥料有効成分が Ca, Si, Mg のみであるのに対して、製鋼スラグは Ca, Si, Mg の他にも P, Mn, Fe など多種類の肥料有効成分を含む。また、製鋼スラグは植物に吸収されやすい可給態けい酸を多く含む。したがって、製鋼スラグは肥料原料として有用と考えられる。製鋼スラグを原料とする肥料の研究開発の事例として、以下の4つを紹介した。(1) 稲の珪化細胞の形成促進とごま葉枯病の抑制、(2) りん酸肥料としての肥料登録、(3) 津波被災農地復興、(4) 堆肥としての活用

Abstract

Both blast furnace slag and steelmaking slag have been utilized as raw materials for fertilizer. Fertilizers made of blast furnace slag or steelmaking slag are categorized in slag silicate fertilizer, byproduced lime fertilizer, slag phosphate fertilizer or iron matter of special fertilizer. Effective elements in blast furnace slag are Ca, Si and Mg. Steelmaking slag contains Ca, Si, Mg, P, Mn and Fe. Steelmaking slag also contains plant available Si. Therefore, fertilizers made of steelmaking slag is more useful. Four research examples were introduced. : (1) Formation of silica body cells by application of silicate fertilizer. (2) Registration as phosphate fertilizer. (3) Restoration of paddy fields damaged by Tsunami. (4) Composting of cow manure using steelmaking slag.

1. 緒 言

2012年度の鉄鋼スラグ協会のスラグ利用統計によると、高炉スラグは土木用途に139万トン、セメント用途に1822万トン、道路路盤材用途に334万トン、製鋼スラグは土木用途に347万トン、セメント用途に53万トン、道路路盤材用途に26万トン、それぞれ用いられている。一方で、肥料、土壤改良用途は高炉スラグで16万トン、製鋼スラグで10万トンと相対的にはまだ少ない。しかし、肥料、土壤改良用途は、鉄鋼スラグの化学的な長所を植物の生長、農業生産に活用できる環境調和型の用途である。肥料取締法によって公定規格が定められており、普通肥料として登録するか、特殊肥料として届出をすることで、肥料として商品化することも可能な特色ある鉄鋼スラグの用途である。

本稿では、まず鉄鋼スラグを原料とする肥料の歴史と肥料取締法で定められている肥料の規格について紹介する。次に高炉スラグと製鋼スラグの肥料原料としての比較と、

含まれる有効成分について説明する。そして2009年度から開始している製鋼スラグの肥料用途拡大をめざした研究開発の事例を一部ではあるが紹介する。なお、本稿では転炉系製鋼スラグを製鋼スラグとして記載した。

2. 本 論

2.1 鉄鋼スラグを原料とする肥料の歴史と肥料取締法

鉄鋼スラグの肥料用途は最初、ヨーロッパを中心にすすんだ。1878年、イギリスでトーマス転炉法が開発された。トーマス転炉法はその後ドイツを中心に発達した。1882年にはドイツのワグネル氏がトーマス転炉法で発生するスラグがりん酸肥料になることを報告している²⁾。トーマス転炉法で発生するスラグを粉砕して作るりん酸肥料“トーマス燐肥”は植物に対するりん酸の効きがよいことから非常に普及し、1960年代にはドイツにおけるトーマス燐肥の年間生産量は250万トンにも達していた。日本では1918年、旧日本鋼管(株)の川崎工場にトーマス転炉法が導入され、ト

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

マス燐肥が製造されていたが、その後トーマス転炉法は普及しなかった。ドイツにおいても1970年代半ばから、植物の必須元素である窒素(N)、りん(P)、カリウム(K)を一度に供給できるNPK化成肥料が使用されるようになり、トーマス燐肥の生産は急激に減少した。現在、トーマス燐肥は製造されていない。

さて、我が国では第二次世界大戦後、肥料として効果がないものも含めて、いろいろなものが肥料として用いられていた。そのような状況を取り締まるべく、1950年に肥料取締法が施行された。肥料取締法では、この法律ができる前から肥料として使われてきたもののうち、農家が五感で肥料効果が期待できそうと認識できるものを特殊肥料として認めている。特殊肥料には例えば、魚かす、米ぬか、堆肥などがある。鉄鋼スラグを原料とする肥料としては、含鉄物が特殊肥料として認められている。特殊肥料(含鉄物)は、褐鉄鉱(沼鉄鉱を含む)、鉍さい(主として鉄分の施

用を目的とし、鉄分を100分の10以上含有するものに限る)、鉄粉および岩石の風化物で鉄分を100分の10以上含有する物として定められている。

肥料取締法では特殊肥料のほかに、普通肥料が新たに定められた。普通肥料は明確な公定規格が定められた肥料であるにもかかわらず、前記のような肥料取締法ができた経緯からか、特殊肥料以外の肥料として定義されている。普通肥料には窒素肥料、りん酸肥料、加里肥料、石灰肥料、苦土肥料、けい酸肥料、マンガン肥料などの規格がある。鉄鋼スラグを原料とする普通肥料としては、現在、鉍さいけい酸質肥料、副産石灰肥料、鉍さいりん酸肥料の規格がある(表1～表3)。

鉄鋼スラグを原料とする肥料の中で、最も代表的なものは、“鉍さいけい酸質肥料”である。けい酸肥料は稲作が盛んな我が国で世界に先駆けて1955年に設定された肥料の規格である。1960年代、“鉍さいけい酸質肥料”の生産

表1 鉍さいけい酸質肥料の規格³⁾
Slag silicate fertilizer in fertilizer control law

Category in Fertilizer control law	Minimum contents of effective constituents (%)	Maximum contents of hazardous constituents (%)	Other regulation
Slag Silicate fertilizer (made of Blast furnace slag or Steelmaking slag)	<p>Case1. In case, Guarantee for soluble SiO₂ and alkalinity</p> <p>Soluble SiO₂ ≥ 10% Alkalinity ≥ 35%</p> <p>Case2. In case, Guarantee for Citric acid soluble MgO or Citric acid soluble Mn or Citric acid soluble B</p> <p>Soluble SiO₂ ≥ 10% Alkalinity ≥ 20% Citric acid soluble MgO ≥ Soluble SiO₂ (%) × 1 Citric acid soluble Mn ≥ Soluble SiO₂ (%) × 1 Citric acid soluble B ≥ Soluble SiO₂ (%) × 0.05</p>	<p>Case1. In case, soluble SiO₂ ≥ 20%</p> <p>(1) Ni = Soluble SiO₂ (%) × 0.01 Cr = Soluble SiO₂ (%) × 0.1 Ti = Soluble SiO₂ (%) × 0.04</p> <p>(2) Ni = 0.4% Cr = 4.0% Ti = 1.5%</p> <p>Case2. Other than case 1 Ni = 0.2% Cr = 2.0% Ti = 1.0%</p>	<p>Case1. In case, soluble SiO₂ ≥ 20%</p> <p>All particles must go through 2mm width net sieve.</p> <p>In case, other than granulized blast furnace slag, More than 60% particles must go through 600μm width net sieve.</p> <p>Case2. Other than case 1 Only for slags, All particles must go through 2mm width net sieve. Soluble CaO ≥ 40%</p> <p>Case3. In case, Alkalinity < 30%, Slag silicate fertilizer whose alkalinity is guaranteed higher than 30% must be mixed with hematite.</p>

表2 副産石灰肥料の規格³⁾
Byproduced lime fertilizer in fertilizer control law

Category in Fertilizer control law	Minimum contents of effective constituents (%)	Maximum contents of hazardous constituents (%)	Other regulation
Byproduced Lime fertilizer (From Non-metal mining industry, Food industry, Pulp industry, Chemical industry, Steel industry, non-ferrous metal manufacturing industry)	<p>Case1. Alkalinity ≥ 35%</p> <p>Case2. In case, Citric acid soluble MgO is guaranteed other than alkalinity, Alkalinity ≥ 35% Citric acid soluble MgO ≥ 1%</p>	<p>Case1. Ni = Alkalinity (%) × 0.01 Cr = Alkalinity (%) × 0.1 Ti = Alkalinity (%) × 0.04</p> <p>Case2. Other than Case1, Ni = 0.4% Cr = 4.0% Ti = 1.5%</p>	<p>Concerned with fertilizers made of Slag, All particles must go through 1.7mm width net sieve. More than 85% of them must go through 600μm width net sieve.</p>

表3 鉍さいりん酸肥料の規格³⁾
Slag phosphate fertilizer in fertilizer control law

Category in Fertilizer control law	Minimum contents of effective constituents (%)	Maximum contents of hazardous constituents (%)	Other regulation
Slag Phosphate fertilizer (From Steelmaking slag)	<p>Case1. Citric acid soluble P2O5 \geq 3% Alkalinity \geq 20% Soluble SiO2 \geq 10%</p> <p>Case2. In case, Citric acid soluble MgO or Citric acid soluble Mn is guaranteed other than Alkalinity \geq 20% and Soluble SiO2 \geq 10%.</p> <p>Citric acid soluble MgO \geq 1% Citric acid soluble Mn \geq 1%</p>	<p>Cd = Citric acid soluble P2O5 (%) \times 0.00015</p> <p>Ni = Citric acid soluble P2O5 (%) \times 0.01</p> <p>Cr = Citric acid soluble P2O5 (%) \times 0.1</p>	All particles must go through 4mm width net sieve.

量は年間100万トン以上であった⁴⁾。その頃に“鉍さいけい酸質肥料”の原料として使われていたスラグは高炉スラグであった。高炉スラグを原料とする“鉍さいけい酸質肥料”は、現在まで“ケイカル”の商品名で使われてきた。しかし、ドイツの“トーマス燐肥”と同じように、1970年代に入って高炉スラグを原料とする“鉍さいけい酸質肥料”の生産量は激減していった。2012年度の鉄鋼スラグ協会の利用統計によると、肥料・土壌改良用途に高炉スラグ、製鋼スラグ合わせて26万トン利用されている状況である。

2.2 高炉スラグを原料とする肥料と製鋼スラグを原料とする肥料

鉄鋼スラグは大きく分けて高炉スラグと製鋼スラグに分けられる。表4に高炉スラグと製鋼スラグの代表的な組成を示した⁵⁾。

高炉スラグは“鉍さいけい酸質肥料”の商品“ケイカル”の原料として、年間16万トン程度、用いられている。製鋼スラグは“鉍さいけい酸質肥料”、“副産石灰肥料”、“鉍さいりん酸肥料”、“特殊肥料”の原料として年間10万トン程度、用いられている。製鋼スラグは高炉スラグよりもけい酸の組成値は低い。しかし、製鋼スラグに含まれるけい酸の多くは植物に利用されやすい可給態けい酸である。したがって、製鋼スラグは高炉スラグよりも効率的に植物にけい酸を供給することが期待できるのである⁶⁾。

表4に示した製鋼スラグの組成は転炉スラグの組成である。製鋼スラグには溶銑予備処理スラグと転炉スラグがあ

表4 高炉スラグと製鋼スラグの代表的な組成
Typical compositions of blast furnace slag and steelmaking slag

	(%)						
	CaO	SiO ₂	MgO	MnO	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	11.0	6.5	5.3	17.4	1.9	1.7

るが、溶銑予備処理スラグにはけい酸含有量が20%を超えるようなものもあり、けい酸肥料の原料として利用されている。また、表4で高炉スラグと製鋼スラグの組成を比較するとわかるように、製鋼スラグにはCaやSiのほかにもMg、Mn、Fe、Pなどの肥料有効成分が含まれている。さらに、高炉スラグはAlの含有量が高い。Alは土壤中でりん酸と結合しやすいため、植物によるりん酸の吸収を阻害する元素である。したがって、製鋼スラグの方が肥料原料としてより好ましいと考えられる。

鉄鋼スラグ協会の利用統計⁷⁾から、高炉スラグ、製鋼スラグそれぞれについて肥料・土壌改良用途の年間利用量の推移をグラフにしたのが図1と図2である。

図1より、高炉スラグの肥料・土壌改良用途は過去5年、年間15万トン程度で変化なく推移している。一方、図2より、製鋼スラグの肥料・土壌改良用途は2010年度は年間6万9千トンであったのに対し、2年連続で増加し、2012年度は年間10万3千トンにまで増加してきている。製鋼スラグを原料とする肥料の有用性が認識されつつある状況にあるのかもしれない。

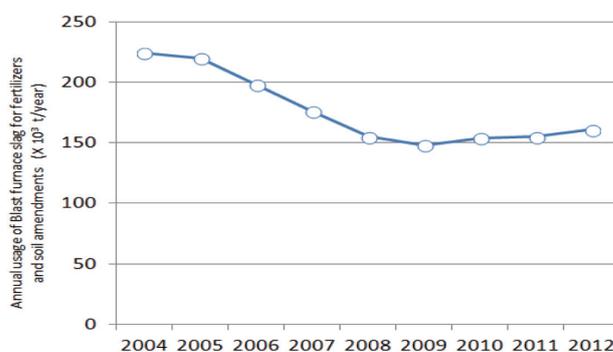


図1 高炉スラグの肥料・土壌改良用途の年間利用量の推移(国内)
Annual usage of blast furnace slag for fertilizers and soil amendments in Japan

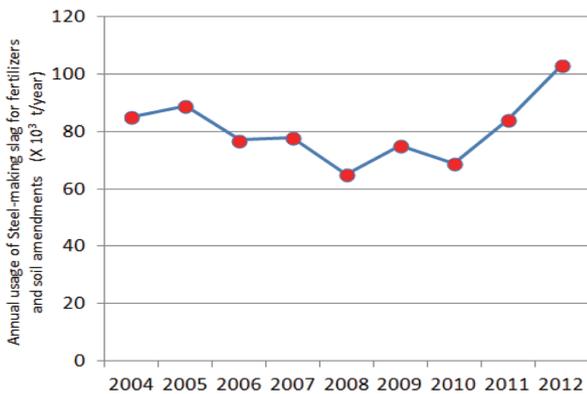


図2 製鋼スラグの肥料・土壌改良用途の年間利用量の推移(国内)

Annual usage of steelmaking slag for fertilizers and soil amendments in Japan

2.3 鉄鋼スラグに含まれる肥料有効成分

肥料有効成分の説明に入る前に、肥料組成の表記の注意点について述べる。

肥料の組成では、多くの肥料有効元素を酸化物として換算して組成を表記することが慣習的に行われる。例えば、CaはCaO、SiはSiO₂、MgはMgO、PはP₂O₅として換算して組成が表記される。しかし、Mn、Feに関しては、元素の含有量で組成が表記される。また、CaOは石灰、SiO₂はけい酸、MgOは苦土(くど)、P₂O₅はりん酸と読む。化学的には正しいとは言えないが、このような慣習的に用いられる肥料組成の表記の特殊性を頭に入れた上で、以下を通読いただきたい。

けい酸(SiO₂)の効果

けい酸は鉄鋼スラグを原料とする肥料で最も主要な肥料効果を示す成分である。例えば、収量が6トン/haの水田では、稲による窒素の吸収量が100～120kg/haであるのに対して、けい酸の吸収量は10倍の1000～1200kg/haにも達することが報告されている⁷⁾。稲は大量のけい酸を必要とする植物なのである。けい酸は稲の根から吸収されると、稲の茎や葉の表層に珪化細胞(後述)というガラス質からなる細胞を形成するのに利用される。珪化細胞は複数列縦方向に整然と並んで形成されるガラス質の硬い透明な細胞であるため、茎や葉をまっすぐ立たせ、受光性を高めて光合成を促進したり、鎧のように植物病原菌の感染を抑制する効果があることが報告されている⁸⁾。

また、けい酸は米の品質や食味にも関与することが報告されている。前述のように稲作1作、1ヘクタール当たり約1トンものけい酸が稲に吸収される。山形大学の藤井教授は、我が国で多くの水田土壌がけい酸不足に陥いる可能性があることを報告している⁹⁾。稲のほかにもけい酸を必要とする植物として、さとうきび、とうもろこし、小麦、大麦などが知られている。

石灰(CaO)の効果

石灰(CaO)はアルカリ性なので酸性土壌を中和する効果がある。また、アルカリ性にするにより、土壌病害の抑制にも効果がある。さらに、カルシウム(Ca)は根を丈夫にし、植物にとって重要なカリウム(K)の吸収促進にも役立つことが知られている。

苦土(MgO)の効果

苦土(MgO)もアルカリ性であり、酸性土壌の土壌改良効果がある。また、マグネシウム(Mg)は葉緑素の構成元素であり、光合成を促進することが知られている。

りん酸(P₂O₅)の効果

りん(P)は植物の必須三要素の一つであり、りん(P)がなければ植物は育たない。りん(P)は、植物の生長、分けつ、根の伸長、開花、結実を促進することが知られている。

マンガン(Mn)の効果

マンガン(Mn)は、葉緑素の生成に関与し、光合成を促進することが知られている。

鉄(Fe)の効果

鉄(Fe)は、土壌中の硫化水素を硫化鉄として無害化することで、根への害を軽減させる効果がある。また、葉緑素の生成にも関与し、光合成を促進することが知られている。

2.4 研究開発の事例紹介

(1) 珪化細胞の形成とごま葉枯病の抑制効果

稲の葉、穂や茎にごま状の斑点が現れ、重症の場合には稲が枯死してしまうごま葉枯病が近年、我が国の主要な米生産地である新潟県を中心に問題になってきている。けい酸肥料は珪化細胞の形成により、ごま葉枯病の抑制に効果があることが期待できる。そこで新潟県農業総合研究所、千葉大学との共同研究で、製鋼スラグを原料とするけい酸肥料を施用することによる、ごま葉枯病への効果を調べた。図3に示したように、土壌に製鋼スラグを原料とするけい酸肥料を1トン/ha施用することによって、稲の葉のごま葉枯病による斑点の数が減少するとともに、葉の表面の珪化細胞がより多く形成されている様子が観察された。さらに、製鋼スラグを原料とするけい酸肥料を施用しなかった葉と比べて、ごま葉枯病の病原菌もほとんどみられなかった。

(2) りん酸肥料としての効果確認と肥料登録

鹿島製鉄所の溶銑予備処理脱りんスラグは、りん酸(P₂O₅)を5%程度含む。鹿島製鉄所 資源エネルギー部の協力のもと、同製鉄所の脱りんスラグを多数試料入手し、肥料取締法に定められた分析を行った結果、いずれも表3に示した鉍さいりん酸肥料の規格を満足することがわかった。同製鉄所の脱りんスラグのりん酸肥料としての肥料効

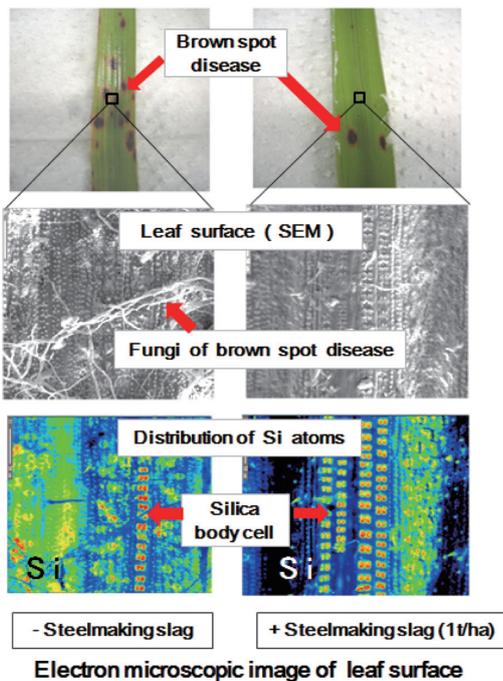


図3 けい酸肥料施用による珪化細胞の形成とごま葉枯病抑制
Formation of silica body cells on rice plant leaf by silicate fertilizer and suppression of brown spot disease

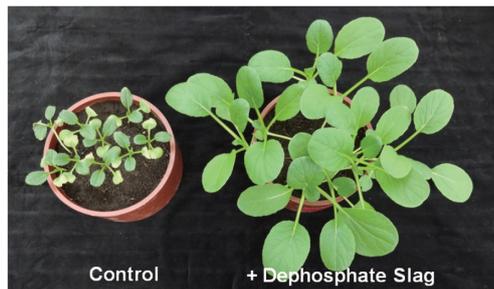


図4 こまつなに対する脱りんスラグの肥料効果
Effect of dephosphate slag on komatsuna growth

果をこまつなで試験したところ、図4に示したような肥料効果が確認できた。

上記の結果を得て、鹿島製鉄所 脱りんスラグを“りん酸肥料鹿島1号”として2013年6月25日に肥料登録することができた。肥料登録証の写しを図5に示す。

(3) 津波被災農地土壌改良のための製鋼スラグ活用

東日本大震災では多くの農地が津波により被災した。宮城県では約15000ヘクタール、福島県では約5900ヘクタールの農地が津波により被災した。

製鋼スラグを原料とする肥料は、多くのCaOを含む。海水により土壌粒子に吸着したナトリウムイオン(Na⁺)と肥料から供給されるカルシウムイオン(Ca²⁺)が交換することで、除塩の促進が期待される。また、津波堆積土ではパイライト(FeS₂)の酸化により硫酸が発生して酸性化することがある。このような場合、製鋼スラグを原料とする

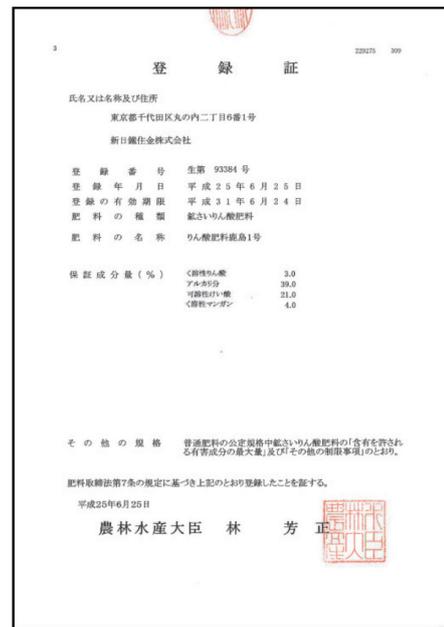


図5 りん酸肥料鹿島1号の肥料登録証
Fertilizer registration proof of phosphate fertilizer 'Kashima No.1'

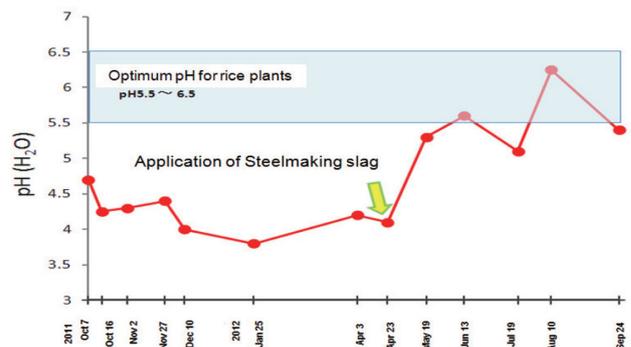


図6 水田土壌のpHの推移
Soil pH in paddy fields in Souma City

肥料に含まれるCaOのアルカリがパイライト(FeS₂)の酸化により酸性化した土壌のpHを改良できることも期待できる。東京農業大学 後藤教授らのグループにより、2012年4月に福島県相馬市の津波被災した水田の酸性化した土壌に、製鋼スラグを原料とする肥料が施用され、水稲が試験栽培された。製鋼スラグを原料とする肥料を施用する前後の水田土壌のpHを図6に示した。pH4に酸性化していた水田土壌に製鋼スラグを原料とする肥料を施用することにより、水稲の栽培に適するとされるpH5.5程度に改良された。水稲は順調に生育し、収穫も平年並みに得られた。

このような2012年度に実施された土壌改良と水稲の試験栽培の結果を得て、津波被災農地の復興を図るプロジェクトが、福島県相馬市でそうまプロジェクトとして東京農業大学、相馬市、JA そうまにより2013年度から実施されている(図7)。2013年度は約40haの津波被災農地に製鋼スラグを原料とする肥料が平均して5トン/ha施用され、

Start of the Souma project

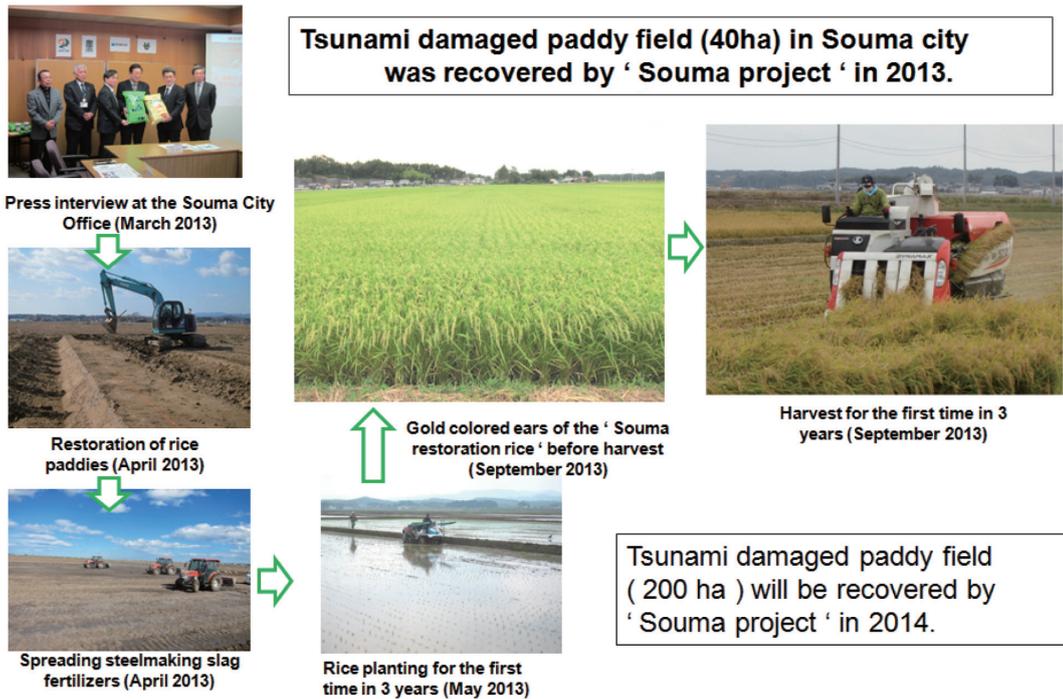


図7 そうまプロジェクト Souma Project

水稲作が行われ、津波被災前と同レベルの米収量が得られた。そうまプロジェクトは継続されており、2014年度は約200haの津波被災農地の復興が計画されている。

なお、そうまプロジェクトとは別に、(一社)日本鉄鋼協会の産発プロジェクトとして、東北大学 多元物質科学研究センター 北村教授、フィールド環境研究センター 伊藤准教授らによる製鋼スラグを利用した津波被災農地復興研究も宮城県内を中心に2014年度まで実施されている。

(4) 堆肥としての活用

家畜ふんは堆肥にすることでN(窒素)、P(りん)を含む肥料として利用できる。家畜ふんに製鋼スラグを混合することで、N、Pの他にCa、Si、Mg、Mn、Feなどを含む堆肥を作ることが可能である。図8は牛ふんに製鋼スラグを15質量%加えて混合した場合と、加えなかった場合での堆肥化試験の様子である。表面から深さ20cmで測定した温度の結果を図9に示す。製鋼スラグを加えて混合した場合は温度が約70℃まで上がったのに対して、加えなかった場合は温度は約58℃までしか上がらなかった。10日毎に切り返しを行った際、温度はいったん下がったが、その後再び上昇した。製鋼スラグを加えた場合は、65～70℃で維持されたことから、短時間で堆肥化がすすんだことが考えられた。作製した堆肥の腐熟度をこまつなを用いて調べた結果を図10に示す。

こまつなを用いた腐熟度の試験結果により、牛ふんに製鋼スラグを加えて作製した堆肥は発芽率が80%以上あり、



図8 堆肥化試験の様子 Composting of cow manure

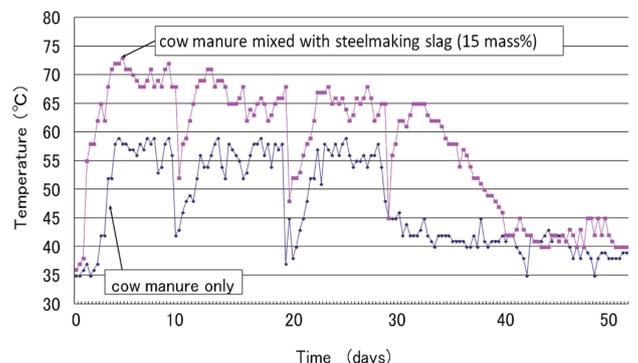


図9 堆肥化試験時の堆肥内部(表面から深さ20cm)の温度の測定結果
Temperature of compost at 20 cm depth from the surface

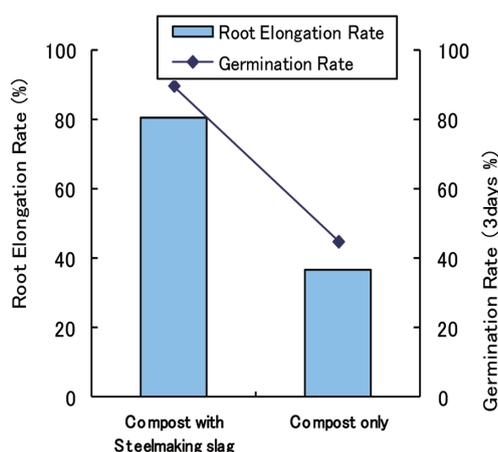


図 10 こまつなを用いた堆肥腐熟度の試験結果
Compost maturation test for komatsuna

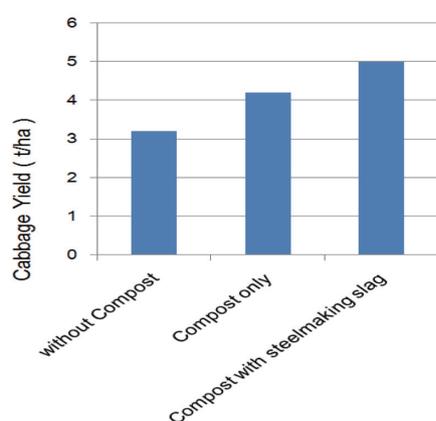


図 11 牛ふんに製鋼スラグを加えて作製した堆肥のキャベツへの肥料効果

Fertilizer effect of compost with steelmaking slag on Cabbage yield

作物の栽培に利用できると判断された。

図 11 は、牛ふんに製鋼スラグを加えて作製した堆肥を用いた場合と、製鋼スラグを加えず作製した堆肥を用いた場合、および堆肥を加えなかった場合のキャベツ栽培試験の結果である。製鋼スラグを加えて作製した堆肥を用いた場合に収量は最も高くなった。

以上のように、製鋼スラグは家畜ふんと混合して堆肥として利用することも可能であることがわかった。

2.5 肥料用途の課題

鉄鋼スラグを原料とする肥料は、植物の必須要素である N (窒素) と K (カリウム) を殆ど含まず、P (りん) も含有量が低いため、NPK を含む化成肥料や堆肥と一緒に用いる必要がある。農家が肥料コストや肥料をまく手間を考える際、優先度が低い肥料ともいえる。このような鉄鋼スラグを原料とする肥料の弱点を克服していく必要がある。

例えば、稲は大量の Si (けい素) を必要とする。国内では水田土壌のけい酸含有量が低下してきているという報告

があり、けい酸の植物への供給能力が高い製鋼スラグを原料とする肥料の普及が期待される。また、Mn, Fe, Mg など、製鋼スラグに含まれる Si, Ca 以外の有効成分についても新たな効果が見つかれば、新規な用途開拓をすすめられる可能性もある。

最後に、鉄鋼スラグの肥料用途で最も注意しなければならない点は、有害重金属のチェックである。銻さいけい酸質肥料、銻さいりん酸肥料という肥料規格の名称で銻さいという表現が用いられている。有害重金属を含むのではないかと不安を抱かれる可能性がある。肥料としての信頼を確立していくために、肥料取締法で定められている有害重金属に関する基準と公害対策基本法で定められている土壤環境基準を遵守していくことは必須である。

3. 結 言

製鋼スラグは Si, Ca, P, Mg, Mn, Fe などのさまざまな肥料有効成分を含む。従来から肥料として用いられてきた、けい酸肥料、石灰肥料のほかに、りん酸肥料として肥料登録されるものも出てきた。水稻は大量の Si (けい素) を必要とするため、けい酸肥料として普及してきたが、酸性土壌の改良などにも有効である。また、単独で肥料として用いる他、家畜ふんなどと混合して堆肥として用いることで、家畜ふんの有効利用を促し、かつ、一度に多種類の肥料有効成分を植物に供給できることが期待できる。

参考文献

- 1) 鉄鋼スラグ協会：H24 スラグ利用統計
<http://www.slg.jp/slag/statistics/index.html>
- 2) 松島喜市郎編：トーマス製鋼法. 千倉書房, 1943
- 3) ポケット肥料要覧 2010. (財)農林統計協会, 2012
- 4) 日本土壌肥料学会編：ケイ酸と作物生産. 博友社, 2002, p. 120
- 5) 鉄鋼スラグ協会ホームページ：鉄鋼スラグの化学特性
<http://www.slg.jp/slag/character.html>
- 6) 伊藤公夫, 遠藤公一, 白鳥豊, 犬伏和之：日本土壌肥料学会講演要旨集. 2013, p. 146
- 7) 日本土壌肥料学会編：ケイ酸と作物生産. 博友社, 2002, p. 48
- 8) JA 全農 肥料農薬部監修：土づくり肥料の Q&A. 2008
- 9) 日本土壌肥料学会編：ケイ酸と作物生産. 博友社, 2002, p. 41



伊藤公夫 Kimio ITO
先端技術研究所 環境基盤研究部
主幹研究員 工学博士
千葉県富津市新富20-1 〒293-8511