

## Techno Scope

震災復興に貢献する

## 鉄鋼スラグ

鉄鋼スラグは、これまで建築・土木用途を中心に活用されてきたが、最近注目されているのが農業への利用である。東日本大震災の津波により、塩害を受けた農地の土壌改良に、転炉系スラグの効果が期待されている。被災農地の復興を支援する鉄鋼スラグについて紹介する。

被災農地で、転炉系スラグを使った除塩対策を行い、営農を再開したビニールハウス(福島県相馬市)

## 建築・土木用途を中心に活用されてきた鉄鋼スラグ

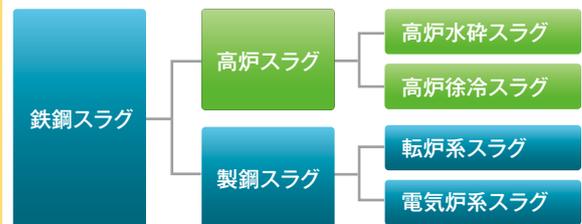
製鉄所で鉄を作れば、必ずスラグが発生する。鉄鋼スラグの生成量は年間約3千数百万tである。

鉄鋼スラグは、発生する過程によって、高炉スラグと製鋼スラグ(転炉系スラグおよび電気炉系スラグ)とに分類される。

高炉スラグは、高炉で鉄鉱石に含まれる鉄以外の成分と、副原料の石灰石やコークス中の灰分と一緒に熔融分離回収されたもので、銑鉄1tあたり約290kg生成される。高炉から排出されたスラグは約1,500℃の熔融状態であり、その冷却方法によって徐冷スラグと水砕スラグに分類される。徐冷スラグは、熔融スラグを冷却ヤードに流し込み、自然放冷と適度の散水により徐冷処理してできた、結晶質で岩石状のスラグである。水砕スラグは、熔融スラグに加圧水を噴射するなど急激に冷却処理してできる、ガラス質で粒状のスラグである。

一方、製鋼スラグは、製鋼工程で副生されるものであり、転炉から生成する転炉系スラグと、電炉で生成される電気炉系スラグがある。製鋼スラグは、高炉徐冷スラグと同様に冷却ヤードで放冷や散水により徐冷処理されたものであり、転炉系スラグは転炉鋼1tあたり約110kg生成される。電気炉系スラグには、酸化精錬で生成する電気炉酸化スラグと還元精錬で生成する電気炉還元スラグがあり、電炉鋼1tあたりで生成される電気炉酸化スラグは約70kg、電気炉還元スラグは約40kgである。

## 鉄鋼スラグの種類



高炉スラグは、セメント原料やコンクリート混和材等の材料として利用されている。高炉スラグ微粉末は、普通セメント(ポルトランドセメント)と同等の性能を持つ高炉セメントの原料となり、高炉セメントは普通セメントに比べて長期間にわたり強度を保ち、水との反応時の発熱速度が小さい、化学的な耐久性が高い、などの特徴を持つ。

また高炉セメントは、天然砂を使う通常のセメントに比べ製造時CO<sub>2</sub>排出量を約40%低減できる。2001年度からは、グリーン購入法における公共工事の調達品目に高炉セメントが指定された。高炉セメントだけでなく、その後も多くのスラグ製品がグリーン購入法の指定を受けている。

一方、製鋼スラグは鉄分を含んでおり、耐摩耗性に優れているため、アスファルトコンクリート用骨材に使用されたり、粒子密度や単位体積重量が大きいいため、土木用資材や地盤改良材としても使用されている。

### 農業分野での鉄鋼スラグの利用

こうした鉄鋼スラグの有効利用は、これまで長年にわたり企業や大学などにおいて研究が行われてきた\*。これまでの用途のほかに、最近期待されているのが、鉄鋼スラグを東日本大震災で津波被害を受けた農地の復旧に役立てようという研究である。

2011年3月11日の東日本大震災に伴う津波により、多くの農地が流出や冠水等の被害を受けた。太平洋岸の被災6県(青森、岩手、宮城、福島、茨城、千葉)において、津波による被災農地面積は合計21,476haであったが、2012年3月11日現在では全体の約27%にあたる5,856haが復旧完了している。農林水産省では、復興マスタープランに基づいて復旧を進めているが、津波被災農地の約9割が営農再開できるのは2014年度という見通しが発表されている。(2012年4月20日農林水産省発表)

\*日本鉄鋼協会では、現在「海洋環境での製鋼スラグの利用技術開発(H22~24)」「鉄鋼スラグ新機能フォーラム(H23~25)」「製鋼スラグによる被災沿岸田園地域の再生(H24~26)」などをテーマとした研究活動が進行中である。

そもそも海水には、塩類(塩化ナトリウムなど)が約3%含まれており、海水をかぶった津波土砂は大量の塩分を含む。一般に、植物が正常に生育できる塩分濃度は0.3%程度であり、津波による塩害を受けた農地では作物を作付けすることはできない。

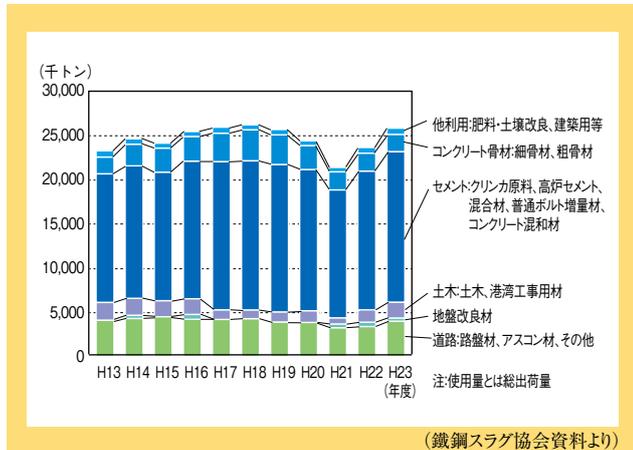
この塩分を除去するために、その効果が期待されているのが転炉系スラグである。鉄鋼スラグの中でも、高炉スラグの主成分がケイ酸カルシウムであるのに対し、転炉系スラグはさらにフリーライムや他の肥料成分を多く含み、土壌改良に効果を発揮する。

転炉系スラグを利用した土壌の除塩の取り組みを進めている東京農業大学の後藤逸男教授によれば、除塩のメカニズムは以下のとおりである。

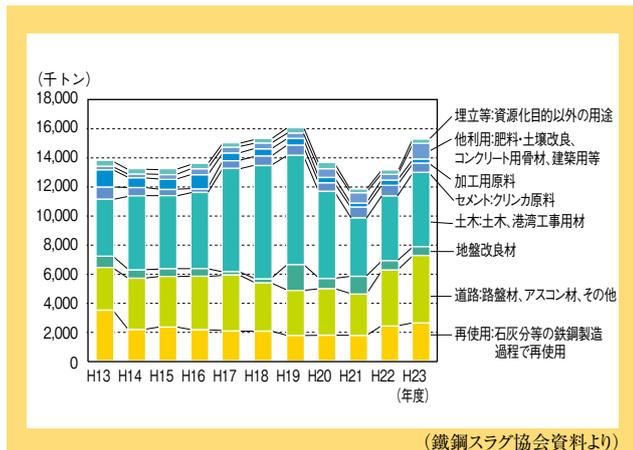
海水が浸入した農地には塩分がしみ込んでいる。もともと土はマイナスの電気を持っている。塩分のうち、塩素イオンはマイナスの電気を持っているので、土には結合せず、水によって簡単に取り除くことができる。しかし、ナトリウムはプラスの電気を持つので、土と結合してしまい、水だけでは簡単に取り除くことができない。

そこで、土壌に吸着されているナトリウムをカルシウムと置き換え、土壌から塩分を溶出させ水に流れやすくすることが必要であり、そのために石こうや炭酸カルシウムなどの石灰資材を使用

#### ■高炉スラグ使用内訳推移



#### ■製鋼スラグ使用内訳推移



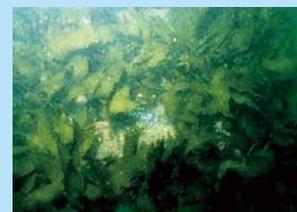
#### 海でも活かされるスラグの利用

最近、注目されているのは、水和固化体や炭酸固化体といった製鋼スラグを使用した固化体である。水和固化体は、天然石やコンクリートブロックのように、港湾土木資材や漁礁・藻場として使用されており、生物付着性にも優れているとの評価を得ている。製鋼スラグに炭酸を吹き込んで固める炭酸固化体は、貝殻やサンゴと同じ炭酸カルシウムの成分でできており、藻場造成礁やサンゴ造成礁としての利用が進められている。

また、藻場が白色小型藻類に覆われる「磯焼け」と呼ばれる現象を防ぐため、磯焼けの原因の一つである海水中の鉄分不足を補う目的で、製鋼スラグを腐食土と混合して海中に設置する技術も開発されている。



製鋼スラグを原料とする大型ブロック(上)は、すでに全国で実証実験・事業が行われており、サンゴ礁再生や藻場造成などに役立っている。港湾や海洋で利用される製鋼スラグブロックの設置状況(右)。



(資料提供:JFEスチール(株))

### 転炉系スラグによる除塩効果を実証したイチゴハウス

福島県相馬市和田地区。例年、冬から春には多くのイチゴ狩りの観光客でにぎわうこの地区で、鈴木さんのハウスでもイチゴの遅い苗がようやく実をつけた頃のことだった。2011年3月11日の東日本大震災で、周囲の田畑は広く津波の被害を受けた。太平洋岸から約3kmの距離にある鈴木さんのイチゴハウスにも津波が押し寄せ、その後は厚さ約10cmの津波土砂が堆積してしまった。

その後、復旧に向けてボランティアによる津波土砂の除去が始まった。しかし津波土砂を除去して処理するには大変な労力がかかる。そこで鈴木さんは後藤教授らの協力を得て、6月から津波土砂を除去せず元の土壌と混層することにした。またこの時に、転炉系スラグを10aあたり1tの割合で施用した。後藤教授らは、土壌の成分変化の観察を続けながら、8月にはソルゴー（緑肥作物）の種まきを行い、9月にはこれを鋤き込んで有機物補給と土壌団粒化の促進を図った。2011年の夏は比較的降雨量が多かったことも幸いし、土壌の塩分は徐々に減少し、当初の予想以上の除



ハウスの中で実ったイチゴ「ふくはるか」。春には元気に実をつけた(2012年4月撮影)。

塩を果たすことができた。

そして9月には、スナップエンドウの作付けを始めた。そのハウスから約200m陸側にある、塩害被害が軽微であった別のハウスには、イチゴの苗を植えることができた。

鈴木さんは、これまでの復旧についてこう話してくれた。

「元の土と混ぜ、転炉系スラグを混ぜて雨にあてる、という簡単な方法でここまで復旧することができた。津波土砂にはいい成分も含まれているからすきこんだ方がよいとアドバイスされ、手間をかけて土砂を取り除かなくてもよかったので、本当によかった」

津波被害をのりこえて実ったイチゴは、復興を目指す人々にとって何よりの収穫となった。

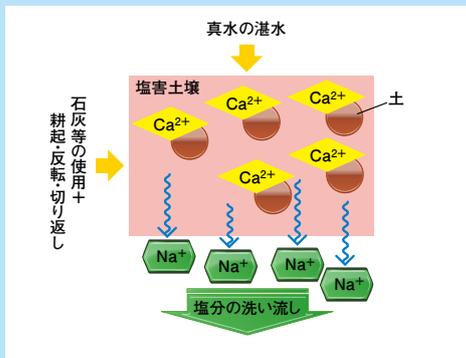


被災後の農地の状況

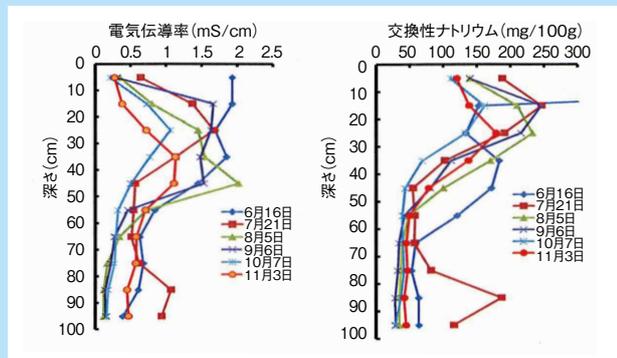


鈴木さん夫妻は震災後に初めてスナップエンドウに挑戦。丸々と大きく甘い実をつけ、直売所で人気となった。

#### ■塩害土壌の改良に役立つ転炉系スラグのメカニズム ■イチゴハウス土壌の電気伝導率と交換性ナトリウムの経時変化



土はマイナスの電気を持っている。ナトリウムはプラスの電気を持つので土と結合してしまう。このナトリウムをカルシウムと置き換えて、土壌から塩分を溶出させることが必要である。このためには、カルシウムの供給源となる石灰資材が有効である。



電気伝導率は、塩類濃度の指標であり、表層10cmでは8月には0.35mS/cmまで低下したが、10~50cmでは1.5mS/cm程度までしか低下しなかった。また交換性ナトリウムは139mg/100gと高く、9月までは土づくりに注力した。9月以降ようやく塩分が減少した。

■代表的な転炉系スラグ肥料の成分



●保証成分(%)

アルカリ分	＜溶性苦土
50.0	4.0

●含有成分(%)

可溶性けい酸	酸化鉄	＜溶性マンガ	＜溶性りん酸	ほう素
15.0	20.0	3.0	1.0	120PPM

ほかに、モリブデン、亜鉛、コバルト等微量

\*＜溶性:肥料成分は溶け方の性質の違いにより、水溶性、可溶性、＜溶性、不溶性に分けられる。＜溶性とは、クエン酸2%液で溶ける肥料成分のことであり、徐々に溶け出すためゆっくり効く。

除塩のために施用された転炉系スラグ。  
φ0.6mm程度の粒状で、手に持ったずしりと重い。

(副産石灰肥料「てんろ石灰」ミネックス資料より)

することが望ましい。このほか、ナトリウムが吸着された土壌は分散しやすい特性があるため、ナトリウムを除去することにより、土壌粒子が流されることを防ぐ効果も期待できる。

また、津波土砂中には1%程度のイオウが含まれており、この土壌はパイライト(FeS<sub>2</sub>)を含む酸性硫酸塩土壌と見なされている。そのため、時間がたつにつれて土壌が酸性化していくおそれがある。このような問題を解決するためにも、石灰資材を使用することが有効だといわれている。そして石灰資材の1種である転炉系スラグは、除塩の促進材として、また土壌の酸性硫酸塩の対策資材として、効果が期待されている。

塩害の土壌改良に期待される転炉系スラグ

転炉系スラグの原料は、鉄鉱石、石炭、石灰岩であり、有害成分を含んでいない。主成分はケイ酸カルシウム、副成分としてフリーライム(生石灰)やマグネシウム、さらに鉄、マンガ、ホウ素などを含む。そのため、転炉系スラグを施用してpH7.5程度以上にまで高めても、作物にマンガやホウ素などの微量元素欠乏がおこりにくい。

また転炉系スラグは、同じ石灰資材である炭酸カルシウムや苦土石灰より緩効的(効果がゆっくり表れ、長続きすること)であり、津波土砂中のパイライトの酸化による土壌の酸性化を抑制するのにも効果がある。また転炉系スラグ中には1~2%のリン酸が含まれ、枯渇が懸念されているリン鉱石(肥料用原料)の代替資源としても注目されている。

転炉系スラグを使用した除塩では、以下のような方法が実施されている。

まず、田畑に堆積した津波土砂を除去せずに、その下の元の土壌と混層する。もし津波土砂を除去することになれば、多大な労力がかかり、除去した後の処分も困難である。また津波土砂には、土壌養分となるマグネシウム、カリウムなどが大量に含まれており、これは肥料成分として役立つことができる。

その後、土壌中に残った塩素は雨によってある程度まで流さ

津波堆積土の改質実証実験に使われた鉄鋼スラグ改質材

鉄鋼スラグを使って、大量の津波堆積土を建設資材として利用可能な土に再生する試みが行われている。

使用する泥土改質材(カルシア系改質材)は、鉄鋼スラグを原料に使い、成分管理と粒度調整を行ったものである。これを泥土と混同することで、施工性と締固め特性に優れた盛土材料に改質することが可能となる。

2011年9月、仙台市宮城野区で実施された実証実験では、がれきを含んだ泥土と泥土改質材を、回転式破碎混合工法を用いて攪拌混合し、効率よく良質な土を得ることができた。この土は復興用盛土材料などへ広く有効利用されることが期待されている。

■カルシア改質材の使用状況(仙台市宮城野区)



がれきを含んだ泥土(上)にカルシア改質材を加え攪拌することにより良質な土が得られる(右)。

(資料提供:新日本製鐵(株)、新日鉄エンジニアリング(株))

れる。さらに、転炉系スラグを施用し、土壌と良く混層する。

つまり、雨水と石灰資材をいかに効果的に利用するかが、除塩のポイントとなる。実際にこの方法によって、すでに多くの田畑で除塩が進められ、作物の植え付けも始まっている。

あまり知られていないが、これまでも鉄鋼スラグは農業用として使われてきた。高炉スラグは肥料成分の酸化カルシウム、酸化ケイ素、酸化マグネシウムを含んでいるため、「鉱さい(けい酸質肥料)」として主に稲作用に使われている。また製鋼スラグは高炉スラグの成分に加え酸化鉄、酸化マンガ、リン酸などを含んでおり、稲作用、畑作用、牧草用の肥料に利用されてきた。さらに製鋼スラグはアルカリ分の作用により、土壌の酸性を改善する効果もあり、高pHでも生育障害を起こさない、などの特徴を持っている。しかし既存肥料より重いなどの理由から、これまでほとんど普及していなかった。

もし、全国の農地で肥料や除塩用資材として鉄鋼スラグを利用するようになれば、農業肥料としての効果を発揮し、製鉄工程の副生物利用もいっそう進むことが期待できる。これまではあまり知られていなかった鉄鋼スラグの農業用資材としての効果に目を向け、今後も継続的に被災農地復興に役立つことを期待したい。

●取材協力 東京農業大学応用生物科学部・後藤逸男教授  
●文 杉山 香里