

ミニ特集：転炉スラグによる土壌病害の被害軽減技術の開発と実用化

# 転炉スラグの農業利用技術の開発と普及

東京農業大学 名誉教授 **後藤逸男**

## はじめに —転炉スラグとは—

筆者が2015年3月に東京農大を定年退職するまでの40年間にわたって続けてきた研究テーマの一つが土壌酸性改良で、そのきっかけは1976年に日本鉄鋼連盟スラグ資源化委員会から日本土壌協会に委託された「鉄鋼スラグの農業利用に関する研究」(日本土壌協会・日本鉄鋼連盟, 1982)であった。東京農大など4大学による研究プロジェクトチームが結成され、筆者らは転炉スラグの農業利用を担当することになった。

製鉄所では高炉の中に鉄鉱石と石灰岩、それにコークスを加えて約1,500℃に加熱し、鉄鉱石中の酸化鉄とコークスから発生する一酸化炭素との還元反応により金属鉄(銑鉄)とする。高炉から取りだしたこの銑鉄には少量の炭素やリン、イオウ等が含まれるためもろく、これから鉄鋼製品を作ることはできない。そこで、溶けた銑鉄を転炉と呼ばれる炉に入れ、そこに生石灰などの副材料を加えて酸素を吹きつけると、酸化反応により銑鉄中の不純物を取り除かれ、純度の高い鋼となる(図-1)。こうしてできた鋼から自動車用鋼板やレール、鋼管等様々な鉄鋼製品が作られる。このような製鋼工程で銑鉄から取り除かれた鉄以外の副産物が転炉スラグで、その成分はケイ酸カルシウムを主体として少量のフリーライム(CaO)のほか、鉄・マンガン・マグネシウム・リン酸・ホウ素等を含む。転炉スラグの化学組成事例は表-1の通りで、土壌改良資材あるいは肥料として有効な成分を含有する。

スラグとは「鉱さい」を意味する。そのイメージから、有害な成分が含まれているのではないかとの懸念の声も聞かれるが、仮に原料中に有害成分が含まれていたとしても、転炉の中は約1,600℃にも達するため、沸点が低いカドミウムやヒ素、水銀等の有害元素は揮散し、PCBやダイオキシン等はすべて熱分解してしまう。

なお、高炉で銑鉄がつくられる際に鉄鉱石中のケイ酸

と石灰岩が反応して生成する副産物が高炉スラグで、両スラグを総称して鉄鋼スラグという。高炉スラグの主成分は非晶質のケイ酸カルシウムで、1955年から「ケイカル(鉱さいケイ酸質肥料)」として主に水田に施用されてきた。1968年ころには年間130万t以上におよんだが、現在ではその1/10程度にとどまっている。一方、転炉スラグは1952年に制定された耕土培養法(1984年

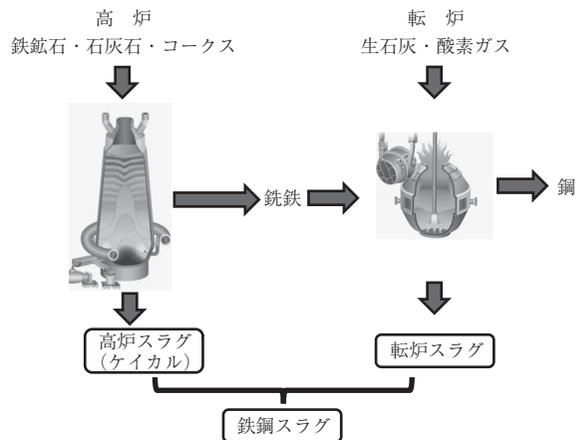


図-1 鉄鋼スラグの種類と製法

表-1 転炉スラグの化学組成(事例)

成分	含有量
ケイ素 (SiO <sub>2</sub> )	14.0 %
アルミニウム (Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	2.8 %
鉄 (Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	24.1 %
マグネシウム (MgO)	6.4 %
マンガン (MnO)	3.6 %
カルシウム (CaO)	41.4 %
ナトリウム (Na <sub>2</sub> O)	0.1 %
カリウム (K <sub>2</sub> O)	0.1 %
リン酸 (P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> )	2.1 %
ホウ素 B	85.0 mg/kg
銅 Cu	13.0 mg/kg
亜鉛 Zn	17.0 mg/kg

Development and Dissemination of Agriculture Utilization Technologies of Converter Slag. By Itsuo Goro

(キーワード：転炉スラグ, 土壌酸性改良, 土壌病害被害軽減)

に廃止)で遊離酸化鉄含有量の少ない老朽化水田に対する鉄補給資材(含鉄物)として指定を受け、主に西日本を中心とする花崗岩風化土壌(まさ土)地帯の水田で利用されてきた。しかし、それ以外では、東北地方の草地において既存の石灰資材の代替資材として利用されていたに過ぎなかった。なお、現在転炉スラグとして市販されている資材は図-2のように粒径や組成の違いにより副産石灰肥料・混合石灰肥料・特殊肥料のいずれかとして登録されている。

**I 転炉スラグの土壌酸性改良資材としての特性**

筆者らは転炉スラグのフリーライムに着目し、土壌酸性改良資材としての効果を確認することから研究をスタートさせた。その効果は、フリーライム含有量と粒径に依存したが、既存の炭カルに比べて2倍以上の施用を要することが明らかになった。しかし、コマツナを用いたポット栽培試験により、土壌 pH(H<sub>2</sub>O) を7以上に高めても、生育に全く支障のないことを見いだした。同じ土壌で同等の pH(H<sub>2</sub>O) に改良した苦土カルと消石灰区で

は図-3のような生育障害が認められた。苦土カルに微量要素肥料(FTE)を混合した試験区では、図-4のように回復したため、既存石灰資材単独区での生育阻害が微量要素欠乏に起因することが判明した。さらに、ポット栽培試験を重ねた結果、転炉スラグを施用して pH(H<sub>2</sub>O) を7程度に高めた土壌で栽培した作物中にはホウ素やマンガンが炭カル区より多く吸収されることが明らかになった(図-5)。また、転炉スラグによる土壌酸性改良には炭カルの2倍以上の施用を必要とするが、施用後3作連続したポット栽培試験では炭カル区に比べ

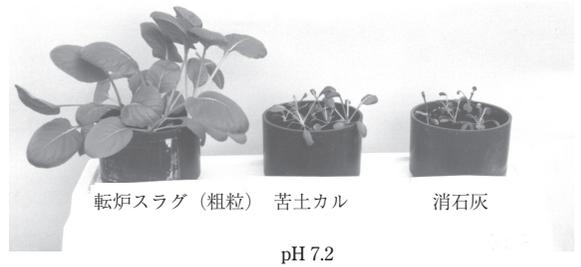


図-3 pH7.2でのコマツナの生育比較(1)



図-2 粒径の異なる2種類の市販転炉スラグ

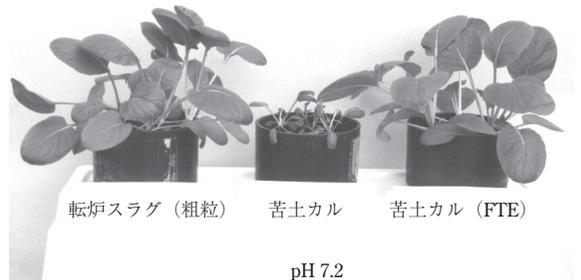


図-4 pH7.2でのコマツナの生育比較(2)

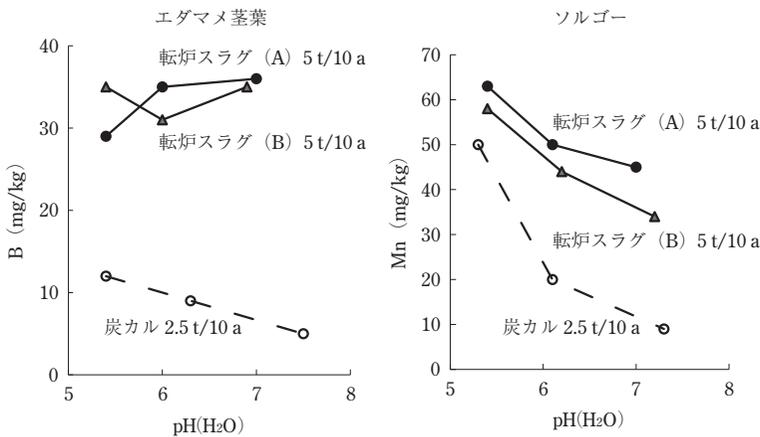


図-5 転炉スラグのエダマメ茎葉へのホウ素(左)とソルゴーへのマンガン(右)補給効果

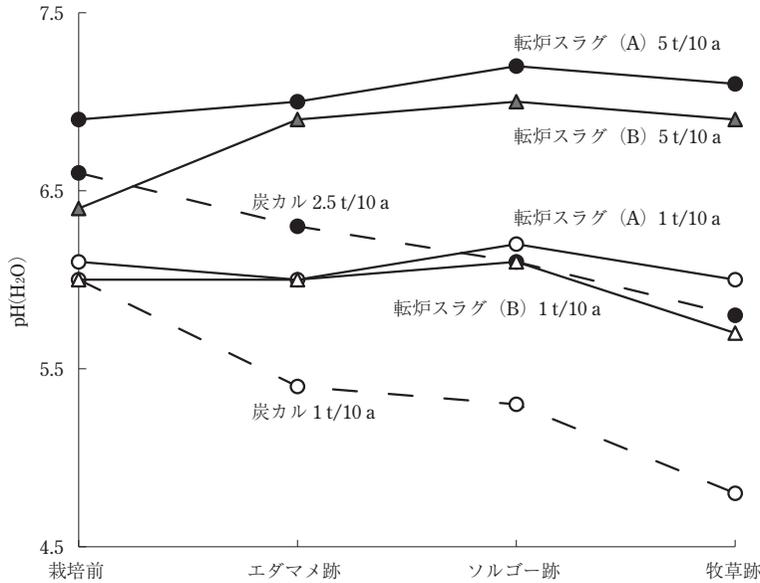


図-6 転炉スラグの土壤酸性改良持続効果(ポット栽培試験)

て顕著な pH(H<sub>2</sub>O) 持続効果が認められた(図-6)。

以上のように、転炉スラグを土壤酸性改良資材として利用すると、pH(H<sub>2</sub>O)を7程度以上まで高めても作物に微量元素欠乏をきたさず、既存の石灰資材に比べて、酸性改良持続効果に優れることが明らかになった。ただし、既存資材より多量施用を要する。

## II 厚かった「土づくり常識」の壁

筆者らが転炉スラグの研究を始めてしばらくしてから、カリフラワーとブロッコリーに根こぶ病がまん延していた東京都三鷹市の農家からその対策のための協力要請があった。筆者らは根っからの土壤肥料屋で、土壤病害のことは門外漢であったが、アブラナ科野菜根こぶ病は酸性土壌で発生しやすく、pHを高めれば抑制可能という程度の知識は持ち合わせていた。そこで、農協青年部長の根こぶ病激発畑で現地試験を行った。畑の半分は転炉スラグを5t/10a施用してpH(H<sub>2</sub>O)を5.7から7.5に高めてカリフラワーを栽培した。その結果、図-7のように明瞭な発病抑制効果が認められて、この技術が瞬く間に三鷹市内に拡がり、最初の試験から約5年後には市内の畑から根こぶ病が一掃された(村上・後藤, 2004; 2010)。ただし、根こぶ病撲滅には転炉スラグによる土壤酸性改良だけではなく、土壤物理性改善のためのサブソイラーによる耕盤破碎、土壤診断に基づく施肥削減、それに三鷹市の転炉スラグ購入費に対する補助制度等の総合防除対策が功を奏した。

その後、京都市のスグキナ産地(村上ら, 2004)や徳

島県・高知県のブロッコリー産地等でも同様の手法による根こぶ病の抑制効果が得られた。しかし、それらの点を面に広げるには多くの時間を要した。我が国では、酸性土壌の改良上限をpH(H<sub>2</sub>O)6.5としている(渡辺ら, 2012)ためである。特に、土壤肥料研究者や普及指導員・営農指導員からは直接・間接に「非常識」との批判を受け、「土づくり常識」の厚い壁に阻まれてしまった。

## III 世界一肥沃な土壤チェルノーゼムでは、pH(H<sub>2</sub>O)が8以上

その後、筆者らは転炉スラグを活用した根こぶ病抑制技術を皮切りに、ターサイ萎黄病・セルリー萎黄病・海老芋萎凋病、ウリ科野菜ホモプシス根腐病、ネギ黒腐菌



図-7 カリフラワー根こぶ病に対する転炉スラグの施用効果(東京都三鷹市)

核病等糸状菌を病原菌とする土壤病害対策に着手した。いずれも、深刻な被害を受けた農家グループから東京農大土壤学研究室への協力要請であった。現地での土壤診断調査・対策試験、学内でのポット栽培試験等を行い、転炉スラグによる土壤高 pH 化が被害軽減に有効であることが明らかになった (大島・後藤, 2015)。

既存の常識から逸脱した新しい農業技術を普及させるには、研究者や技術者ばかりでなく農家に納得させることが最も重要である。2003年に世界で最も肥沃な土壤チェルノーゼムが分布するウクライナに行く機会に恵まれた。そこで採取したチェルノーゼムと転炉スラグを施用した静岡県浜松市のセルリーハウスの土壤診断図を図-8に示す。地力増進法の畑土壤改善目標値に基づいて作成したレーダーチャートでは、セルリーハウスの pH(H<sub>2</sub>O) が上限値を大きく超過しているが、チェルノーゼムでは、pH(H<sub>2</sub>O) がさらに高く 8.1 であった。このチェルノーゼムの土壤診断図が農家の不安を解消するにはたいへん有効で、転炉スラグの多量施用に同意してもらえた。静岡県浜松市のセルリー産地では、地元 JA のサポートもあり、萎黄病の発病抑制対策資材としての転炉スラグ施用が 2005 年ころから定着した。

#### IV 転炉スラグの普及に向けて

##### 1 点から面に拡がり始めた転炉スラグ利用技術

2006年に「おもしろ生態とかしい防ぎ方 根こぶ病」(後藤・村上, 2006) を出版したころから、転炉スラグ

を活用した根こぶ病対策が注目され始め、2006年には宮城県からの要請により、普及センターと共同で現地プロジェクト栽培試験を行った。三重県、大分県、熊本県、千葉県、青森県等では公的機関での現地試験が行われるようになった。

その後、2010年から開始された農水省の大型研究プロジェクト「被害リスクに応じたウリ科ホモプシス根腐病の総合防除技術の確立」では、転炉スラグを活用したホモプシス根腐病防除マニュアルが作成された (岩館, 2013)。また、それに基づき岩手県などでは夏秋キュウリのホモプシス根腐病対策資材として普及が進んでいる (岩館, 2014)。2012年からは、「転炉スラグによる土壤 pH 矯正を核としたフザリウム性土壤病害の耕種的防除技術の開発」が行われ、多くの有効な知見が得られている。転炉スラグ利用技術は着実に点から面に拡大されつつある。

##### 2 マルチ効果が期待できる転炉スラグ

転炉スラグは水田での含鉄資材、畑での土壤酸性改良資材だけにとどまる資材ではない。転炉スラグには 1~2% のリン酸が含有されている。年間発生量が 1,300 万 t (鉄鋼スラグ協会, 2015) に達するため、そのリン酸量は約 21.3 万 t で、何とリン鉱石の年間輸入量中のリン酸に匹敵する (後藤, 2010)。転炉スラグは有望な国産リン酸資源でもある。また、転炉スラグは水稻へのケイ酸補給、水田作土への鉄補給による老朽化防止のほか、鉄とマンガン補給により水田からのメタンガス発生

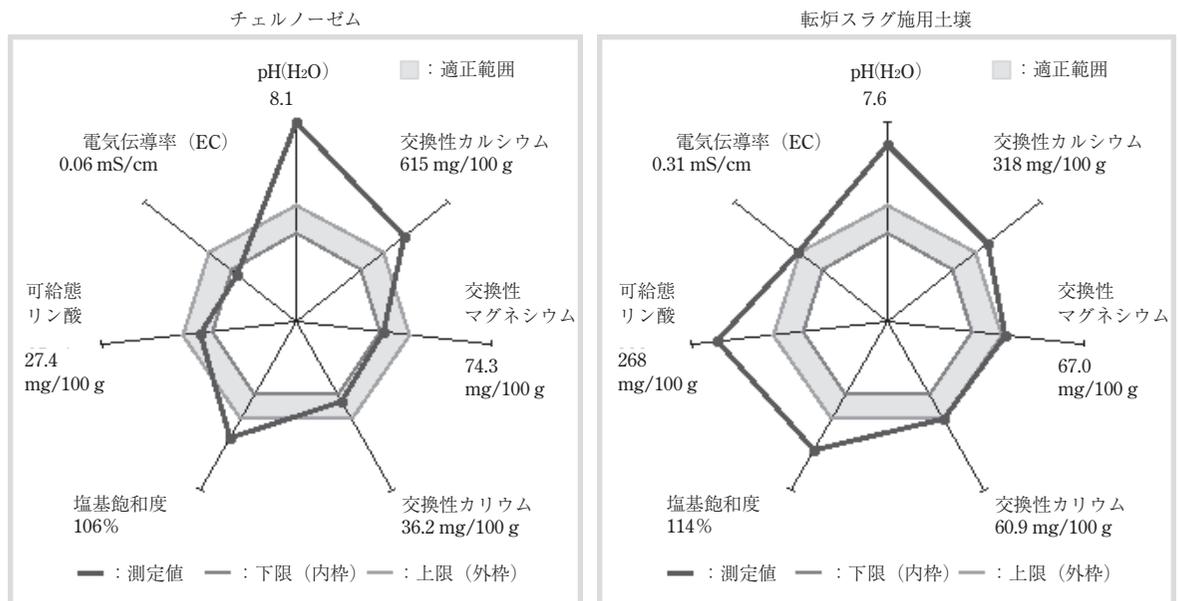


図-8 チェルノーゼム (左) と転炉スラグ多量施用土壤 (右) の土壤診断図

抑制にも有効であることが犬伏（1998）により明らかにされている。

さらに、土壌を高 pH 化すれば農作物へのカドミウム吸収が抑制されるので、転炉スラグを利用すれば、作物生育に悪影響を及ぼすことなく、カドミウムの吸収を抑制することもできる。

2011年3月11日の東日本大震災に伴う大津波で被災した福島県相馬市では、2012年から4年間に約650haの水田で営農が再開されたが、その間に約4,000tの転炉スラグが除塩促進・土壌酸性改良資材として活用された（後藤・稲垣，2015）。

このように、転炉スラグはすばらしい威力と魅力に溢れる農業資材であるにもかかわらず、国内での農業利用量はわずか10万t程度で、全生産量の1%にも満たない。より積極的な農業利用のための普及拡大を図るべきである。

## おわりに 一転炉スラグ利用上の注意点一

### 1 施用量と初期投資には覚悟が必要

これまでの石灰資材といえ、毎年100kg/10a前後施用する資材というイメージが強い。しかし、転炉スラグを畑やハウスでの土壌病害対策資材として使う場合には、覚悟を決めて一度に多量施用する。施用量は施用する土壌の性質やpH、それに利用する転炉スラグの種類によっても異なるので、面倒ではあるが緩衝能曲線から決定する。その方法は基本的に従来と同じであるが、必ず施用する転炉スラグを使う。なお、緩衝能曲線から転炉スラグ施用量を決定する具体的な方法については、下記アドレスからダウンロードした資料を参照いただきたい。

[https://www.naro.affrc.go.jp/publicity\\_report/publication/files/tenro-slag.pdf](https://www.naro.affrc.go.jp/publicity_report/publication/files/tenro-slag.pdf)

土壌病害被害軽減対策には改良目標pH(H<sub>2</sub>O)を7.5とするが、大まかな施用量は数t/10a以上となる。特に、緩衝能が強い黒ボク土では5～10t/10aに達することも珍しくない。東京都三鷹市で行った実証試験では、pH(H<sub>2</sub>O)5.8の黒ボク土の畑に転炉スラグを5t/10aと水酸化マグネシウム250kg/10aを施用した。施用後には7.9にまで上昇し、ブロッコリー根こぶ病を完全に抑えることができた。その後、少なくとも10年間にわたり7程度以上を維持した。この間転炉スラグは施用しなかった。

この事例のように、従来の常識から大きく逸脱した大量の転炉スラグを施用するには、それなりの初期投資が必要で、それが転炉スラグ利用技術の普及を遅らせてきた要因の一つであった。

既存資材である苦土カルを慣行的に毎作100kg/10aすると、それに要する資材費は2,000円程度で済む。一方、転炉スラグを仮に1t/10a施用するとすれば、どの程度の経費を要するか試算してみよう。転炉スラグの市販価格は地域や購入量などにより変動するが、粉状品20kg袋であれば、一袋当たり700円前後である。したがって、1t/10a（50袋）では35,000円前後となり、何と慣行の20倍近くにも達する。また、品代だけでなく、20kg詰めの袋を破袋してライムソーのポッパーに詰めるための作業が容易ではない。そこで、20kg袋詰めに200kgのフレコンに代えると作業効率がよくなるばかりでなく、品代が25,000円前後まで軽減される。

次に、転炉スラグに含まれる副成分の経済価値を見積もってみよう。転炉スラグには2%前後のリン酸が含まれている。転炉スラグ中のリン酸は水には溶けないく溶性リン酸で、その効果は熔成リン肥（熔リン）100kg、金額にして約7,500円に匹敵する。そのため、転炉スラグを1t/10a施用すれば、リン酸肥料を施す必要がない。さらに、転炉スラグにはマンガンやホウ素などの微量要素が含まれているので、微量要素肥料の施用も不要となる。転炉スラグに含まれる微量要素と類似の成分を含む微量要素肥料を標準量施用すると約1,000円を要する。

苦土カル100kg/10a施用であれば、2,000円程度で済むが、土壌pH(H<sub>2</sub>O)を6.5程度まで高めるには、転炉スラグ施用量の1/3～1/2程度必要となるので、仮に300kg/10a施用するとすれば、苦土カル6,000円程度となる。さらに、リン酸肥料（熔リンとして100kg/10a）や微量要素肥料（4kg/10a）を施用すれば、資材費は14,500円程度となる。ただし、苦土カルを用いてpH(H<sub>2</sub>O)6.5程度の酸性改良では十分な土壌病害被害軽減効果は期待できないので、薬剤による土壌消毒を行えば、さらに経費が高む。一方、転炉スラグによりpH(H<sub>2</sub>O)を7.5程度まで高めると、少なくとも5年程度の持続効果が期待できる。初期投資にはそれなりの覚悟を要するが、長い目で見れば経済的にも十分採算が合う。

なお、転炉スラグそのものは鉄鋼業の副産物であるが、その破碎・粒度調整・防散処理などに経費を要する。また、運賃が転炉スラグ経費の多くを占める。転炉スラグを原料とする肥料メーカーは北海道から九州まで各地に点在するので、ユーザーにとってはできる限り近距離にあるメーカー品を選び、しかも数量をまとめて発注することが得策である。

### 2 粉状転炉スラグをライムソーで

市販されている転炉スラグには粉状品と造粒品がある。造粒品は散布しやすいが、転炉スラグの性質（セメ

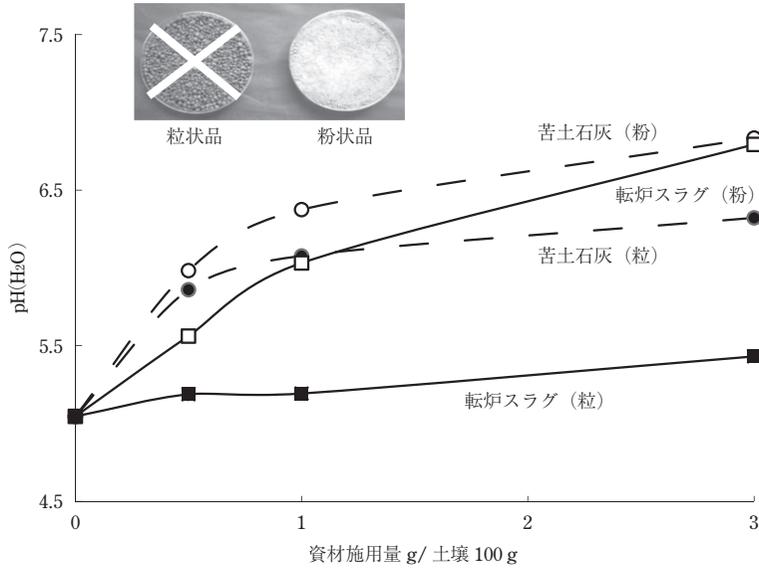


図-9 転炉スラグと苦土カルの形状の違いが酸性改良効果に及ぼす影響

ント効果)で土壤崩壊性が極めて悪いので、図-9のように土壤酸性改良効果が著しく低下する。そのため、必ず粉状品を使う。ただし、粉状品は散布時に飛散しやすいので、風のない日にライムソウで散布することが最善である。最近では、防散処理を施した粉状品も市販されるようになった。

粉状転炉スラグにも粒径が細かい副産石灰登録品(1.7 mm全通, 0.6 mm以下が85%以上)と粗い特殊肥料登録品(3.35 mm全通)がある。前者の細粒品は初期のpH上昇効果, 後者の粗粒品はpH改良持続効果が高く, 両者一長一短で優劣はつけがたい。両者を混ぜて施用することが最善である。

転炉スラグの欠点は苦土カルより苦土含有率が低いことである。そのため、転炉スラグ施用時に10%程度の水酸化マグネシウムを併用することが望ましい。また、転炉スラグ施用後の土壤pHは維持できても交換性マグネシウムが溶脱しやすいので、定期的に土壤診断を行い、不足分を水酸化マグネシウムで補給する。なお、転炉スラグに酸化マグネシウムを混合した混合石灰肥料登録品も市販されている。

### 3 転炉スラグ施用直後には窒素施肥量削減

転炉スラグを施用して土壤pH(H<sub>2</sub>O)を7.5に上げることで被害軽減が確認されている土壤病害は根こぶ病, ウリ科ホモプシス根腐病, フザリウム病, ネギ黒腐菌核病, ニンニク紅色根腐病, それにトマト青枯病であり, 逆に放線菌を病原菌とするジャガイモそうか病では発病

が助長される。転炉スラグに限らず石灰資材を施用して土壤pHを高めることは容易だが, pHを元に戻すことは至難の業であるので十分注意する必要がある。

また、転炉スラグを施用して土壤pHを高めるとアルカリ効果により可給態窒素が増加して, キャベツやスイカ, メロンの玉割れ, 水稻では倒伏するおそれがあるので, 転炉スラグ施用後最初の作付け時には窒素施肥量を削減あるいは無窒素とすることが望ましい。

肥料資源をはじめ天然資源に恵まれない我が国にとって, 国内の製鉄所で大量に生産される転炉スラグは貴重な国産資源で, 今後の「健康な土づくり」に役立つ農業資材である。

### 引用文献

- 1) 後藤逸男 (2010): 文化土壤学からみたリン, 博友社, 東京, p.65 ~ 100.
- 2) 後藤逸男・稲垣剛生 (2015): 土肥誌 86: 456 ~ 462.
- 3) ———・村上圭一 (2006): 根こぶ病, 農文協, 東京, p.77 ~ 84.
- 4) 犬伏和之 (1998): 鉄鋼環境基金 1998 年度報告書: 447 ~ 475.
- 5) 岩館康哉 (2013): ウリ科野菜ホモプシス根腐病被害回避マニュアル 農研機構 (東北農研七): 24 ~ 27.
- 6) ——— (2014): 岩手農研七研報 13: 69 ~ 160.
- 7) 村上圭一ら (2004): 土肥誌 75: 233 ~ 235.
- 8) ———・後藤逸男 (2004): 同上 75: 53 ~ 58.
- 9) ——— (2010): 化学と生物 48: 608 ~ 613.
- 10) 日本土壤協会・日本鉄鋼連盟 (1982): 昭和56年度鉄鋼スラグの農業的利用に関する研究報告書, p.41 ~ 77.
- 11) 大島宏行・後藤逸男 (2015): 土肥誌 86: 81 ~ 88.
- 12) 鉄鋼スラグ協会 (2015): 転炉スラグ利用統計表, 鉄鋼スラグ統計年報 (平成26年度実績), 鉄鋼スラグ協会, 東京, p.22 ~ 24.
- 13) 渡辺和彦ら (2012): 土と施肥の新知識, 全国肥料商連合会, 東京, p.8 ~ 36.