



農研機構東北農業研究センターシンポジウム

鉄鋼スラグは有望な農業資材となり得るか？

— 農業分野での技術開発の可能性を探る —

講演要旨集

平成27年11月27日（金）10：00～16：30

東京農業大学 横井講堂
(東京都世田谷区桜丘1-1-1)

主 催：国立研究開発法人農業・食品産業技術総合研究機構東北農業研究センター

後 援：東京農業大学、日本土壌肥料学会、日本植物病理学会

本資料から転載、複製、引用する場合は
著者の許可を得てください。

*「農研機構」は国立研究開発法人農業・食品産業技術総合研究機構のコミュニケーションネーム（通称）です。

目 次

1. 鉄鋼スラグを農業生産現場で活用するための研究開発と普及 東京農業大学名誉教授 後藤逸男	1
2. 東北地域における野菜類土壌病害の被害軽減技術への転炉スラグの利用 (地独)青森県産業技術センター農林総合研究所 岩間俊太	7
3. 転炉スラグ施用時の肥培管理と復田した場合の影響 (地独)青森県産業技術センター農林総合研究所 谷川法聖	15
4. 栽培農家での利用の現状と課題 とぴあ浜松農業協同組合 高倉克弥	21
5. 被害軽減機構解明の試み 農研機構東北農業研究センター 門田育生	25
6. 土壌微生物の動態から見た転炉スラグの特性 農研機構北海道農業研究センター 森本 晶	31
7. 新たな防除技術開発に向けて 農研機構東北農業研究センター 今崎伊織	35
8. 作物のカドミウム吸収抑制への利用 東京農業大学生物応用化学科 大島宏行	41
9. 藻場造成等海域利用に向けた取り組み 新日鐵住金(株)先端技術研究所 加藤敏朗	45
10. 転炉スラグ施用による水田からのメタンガス抑制 千葉大学大学院園芸学研究科 犬伏和之	51

鉄鋼スラグを農業生産現場で活用するための 研究開発と普及

後藤 逸男
東京農業大学名誉教授

1. 転炉スラグとは

演者が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ひと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」¹⁾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、演者らの担当課題が転炉スラグの農業利用であった。

転炉スラグとは、製鉄所の製鋼工程で鋼の副産物として生産される鉱さい(スラグ)で、ケイ酸カルシウムを主成分として少量のフリーライム(CaO)の他、鉄・マンガン・マグネシウム・リン酸・ホウ素などを含む。一方、転炉の中は約1,600°Cにも達するため、沸点が低いカドミウムやヒ素、水銀あるいはPCBやダイオキシンなどの有機性有害成分は含まれていない。

製鉄所では製鋼工程の前段階として、高炉で鉄鉱石に石灰とコークスを混合して還元反応により鉄鉄を作る。その工程で副成される鉱さいが高炉スラグで、両スラグを総称して鉄鋼スラグという。高炉スラグは古くから「ケイカル」として水田へのケイ酸肥料として農業利用され、1968年頃には年間110万トン以上におよんだが、現在では20万トン程度に留まっている。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。

2. 転炉スラグの土壌酸性改良資材としての特性

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(H₂O)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(H₂O)に改良した苦土カルと消石灰区では写真1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、写真2のように回復したため、既存石灰資材単独区での生育障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(H₂O)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1)。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て顕著なpH(H₂O)持続効果が認められた(図2)。

以上のように、転炉スラグを土壌酸性改良資材として利用すると、pH(H₂O)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。



写真1 高 pH で生育する転炉スラグ区のコマツナ

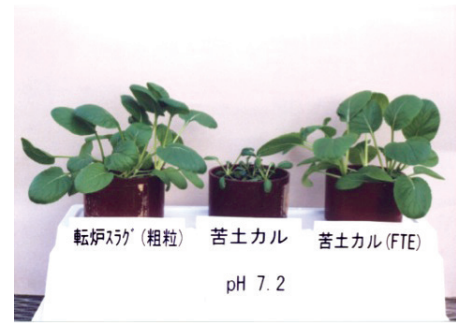


写真2 転炉スラグの微量元素効果

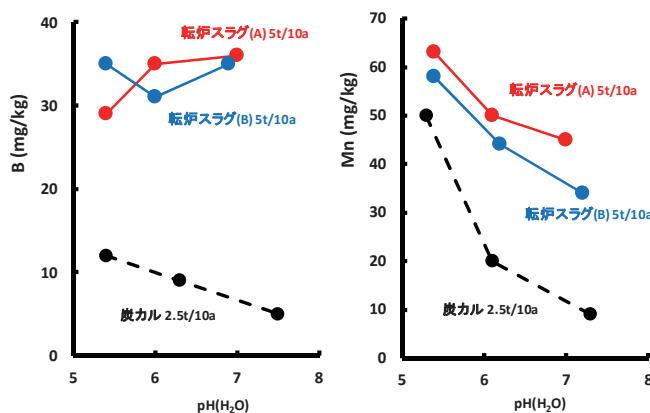


図1 転炉スラグのエダマメ茎葉へのホウ素(左)とソルゴーへのマンガン(右)補給効果

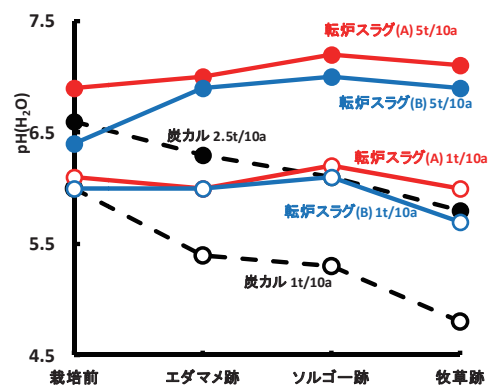


図2 転炉スラグの土壤改良持続効果

3. 厚かった「土づくり常識」の壁

演者らが、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蔓延していた東京都三鷹市の農協を通じて農家から防除のための協力要請があった。演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。畑の半分に転炉スラグを 5t/10a 施用して pH(H₂O)を 5.7 から 6.9 に高めてカリフラワーを栽培した。その結果、写真3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²³⁾。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など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⁴⁾や徳島県・

高知県のブロッコリー産地など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。わが国では、酸性土壌の改良上限を pH(H₂O)6.5 としている⁵⁾ ためである。特に、土壌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。

4. 世界一肥沃な土壌チェルノーゼムでは、pH(H₂O) が 8.1

その後、演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、ネギ黒腐菌核病など糸状菌を病原菌とする土壌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壌学研究室への協力要請であった。現地での土壌診断調査・対策試験、学内でのポット栽培試験などを行い、転炉スラグによる土壌高 pH 化が防除に有効であることが明らかになった⁶⁾。

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壌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壌診断図を図 3 に示す。地力増進法の畑土壌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(H₂O)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(H₂O)がさらに高く 8.1 であった。このチェルノーゼムの土壌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 年頃から定着した。

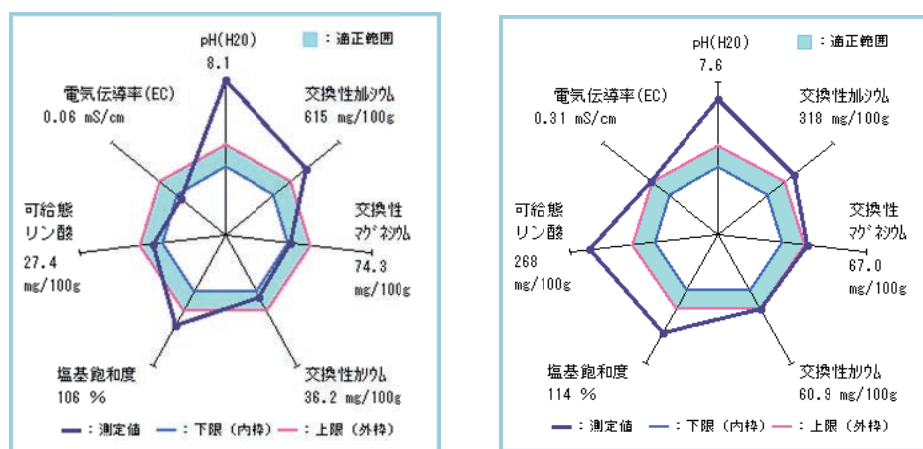


図 3 チェルノーゼム(左)と転炉スラグ施用土壌(右)の土壌

5. 点から面に広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こい防ぎ方 根こぶ病」⁷⁾を出版した頃から、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ブロッコリー栽培試験を行った。三重県、大分県、熊本県、千葉県、青森県など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⁸⁾。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実用化が進んでいる⁹⁾。2012年からは、「転炉スラグによる土壌pH矯正を核としたフザリウム性土壌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。

6. 転炉スラグの威力と魅力

転炉スラグは水田での含鉄資材、畑での土壌酸性改良資材だけに留まる資材ではない。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1,300万トン¹⁰⁾に達するため、そのリン酸量は約21.3万トンで、何とリン鉱石の年間輸入量中のリン酸に匹敵する¹¹⁾。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他に、鉄とマンガン補給により水田からのメタンガス発生抑制にも有効であることが犬伏ら¹²⁾により明らかにされている。

また、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4,000トン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。

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10万トン程度で、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。



写真4 福島県相馬市の津波被災水田での
転炉スラグ施用(2013)

7. 転炉スラグの普及拡大を！

転炉スラグの農業利用を促進させるには、「スラグ＝産業廃棄物」の意識払拭と施用時の散布効率向上(施用量削減・飛散防止)が必要である。粒径を細かくすれば施用量を減らすことができる反面、持続効果が低下し、散布時の飛散が大きな課題となる。飛散対策として転炉スラグを造粒化するとセメント効果により土壌崩壊性が著しく悪化して、図4のように土壌酸性改良効果が著しく低下する。そこで、副産石灰規格(1.7mm全通、0.6mm以下が85%以上)あるいは2mm全通程度まで粉碎した特殊肥料規格(3.35mm全通)として、防散処理を施すことが最善である。転炉スラグの散布にはライムソワーが最適であるが、ブロードキャスターでも散布可能な防散加工品の普及を期待したい。

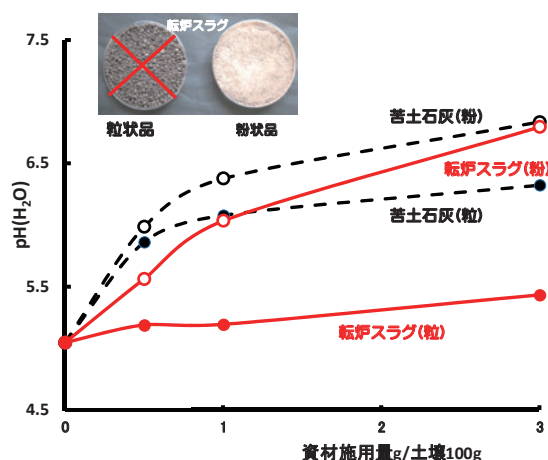


図4 転炉スラグと苦土カルシウムの形状の違いが
酸性改良効果に及ぼす影響

8. 万能ではない転炉スラグ：施用上の注意点

転炉スラグにも欠点がある。まずは、カルシウムに対するマグネシウム含有量が少ないことである。そこで施用後の土壤中の塩基バランスを保つため、転炉スラグ施用量の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壌 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、定期的に土壌診断を行い、不足分を水酸化マグネシウムで補給する。

根こぶ病やフザリウム病に対して有効な転炉スラグもジャガイモそうか病の発病を助長する。また、転炉スラグを施用して pH を高めた土壌を元に戻すことは至難の業であるので、注意を要する。転炉スラグを施用して土壌 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わが国にとって、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。

文 献

- 1) (財) 日本土壌協会・(社) 日本鉄鋼連盟：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(1982)
- 2) 村上圭一・篠田英史・丸田里江・後藤逸男：転炉スラグによるブロッコリー根こぶ病の防除対策、土肥誌、75、1、53～58(2004)
- 3) 村上圭一・後藤逸男：「転炉スラグ」で土壌環境を制御する、化学と生物、48、9、608～613(2010)
- 4) 村上圭一・後藤逸男：スグキナ根こぶ病に対する転炉スラグの防除効果、土肥誌、75、2、233～235(2004)
- 5) 渡辺和彦・後藤逸男・小川吉雄・六本木和夫：土壌の基礎知識、土と施肥の新知識、8～36、農文協、東京(2012)
- 6) 大島宏行・後藤逸男：ホモプシス根腐病の発病に及ぼす土壌の種類、施肥リン酸、土壌 pH の影響、土肥誌、86、2、81～88(2015)
- 7) 後藤逸男・村上圭一：ひと味ちがう酸性改良、根こぶ病 おもしろ生態とかしこい防ぎ方 - 土壌病害から見直す土づくり -、77～84、農文協、東京(2006)
- 8) 岩館康哉：転炉スラグを用いた土壌 pH 改良による露地キュウリの被害軽減、ウリ科野菜ホモプシス根腐病被害回避マニュアル、24～27、農研機構(東北農研セ)(2013)
- 9) 岩館康哉：岩手県におけるキュウリホモプシス根腐病の発生生態と防除に関する研究、岩手農研セ研報 13、69～160(2014)
- 10) 鉄鋼スラグ協会：転炉スラグ利用統計表、鉄鋼スラグ統計年報(平成 25 年度実績)、<http://www.slg.jp/pdf/fs-143-04.pdf>(2014)
- 11) 後藤逸男：バイオマス資源と製鋼スラグ中のリン酸、文化土壌学からみたリン、65～100、博友社(株)、東京(2010)
- 12) 犬伏和之：含鉄資材の施用による水田からのメタン放出抑制、鉄鋼環境基金 1998 年度報告書(1998)

東北地域における野菜類土壌病害の被害軽減技術への 転炉スラグの利用

岩間 俊太

(地独) 青森県産業技術センター農林総合研究所

1. はじめに

転炉スラグを用いて土壌 pH を 7.5 程度まで矯正することで、農薬を使わずにアブラナ科野菜根こぶ病（病原菌：*Plasmodiophora brassicae*）の被害を持続的に軽減できる技術が、1970 年代から東京農業大学の後藤らによって研究・実践されている¹⁾。本技術は、「根こぶ病がアルカリ性土壌で発病しにくくなるという性質」、「転炉スラグ中には微量元素が豊富に含まれているため、施用しても作物に微量元素欠乏が起こりにくいという特性（通常、アルカリ性土壌では微量元素が吸収されにくくなる）」、「転炉スラグ施用による土壌 pH 矯正効果の持続性」を活かした技術である。

青森県では本技術の導入を 2007 年に計画し、2008～2010 年にアブラナ科野菜根こぶ病対策としての試験を行い、得られた成果は被害軽減技術として普及段階にある。また、根こぶ病以外の野菜類土壌病害への本技術の適用拡大を図るため、土壌伝染性のフザリウム病対策としての試験を 2008～2010 年にメロンつる割病（病原菌：*Fusarium oxysporum* f. sp. *melonis*）で、2010～2011 年にキュウリつる割病（病原菌：*F. oxysporum* f. sp. *cucumerinum*）で、2011～2014 年にレタス根腐病（病原菌：*F. oxysporum* f. sp. *lactucaae*）で行い、いずれの病害についても、得られた成果は普及段階にある。さらに、土壌伝染性のフザリウム病以外の対策としての試験についても、ニンニク黒腐菌核病（病原菌：*Sclerotium cepivorum*）では 2010、2013、2014 年植え付けで、ニンニク紅色根腐病（病原菌：*Pyrenochaeta* sp.）では 2013、2014 年植え付けで行うとともに、2015 年にはトマト青枯病（病原菌：*Ralstonia solanacearum*）で行い、得られた成果の 2016 年度からの普及を目指している。

これらのうち、レタス根腐病については、2012～2014 年に実施された農林水産省の「農林水産産業・食品産業科学技術研究推進事業（新たな農林水産政策を推進する実用技術開発事業）：転炉スラグによる土壌 pH 矯正を核としたフザリウム性土壌病害の耕種的防除技術の開発」によって得られた成果であり、トマト青枯病については、本事業の中で東北農業研究センターによって明らかにされた成果を青森県内で応用・実証しているものである。また、本事業の中では、岩手県農業研究センターによってハウレンソウ萎凋病（病原菌：*F. oxysporum* f. sp. *spinaciae*）で、宮城県農業・園芸総合研究所および福島県農業総合センターによってイチゴ萎黄病（病原菌：*F. oxysporum* f. sp. *fragariae*）で、東京農業大学によってセルリー萎黄病（病原菌：*F. oxysporum* f. sp. *apii*）で、本技術による被害軽減効果が明らかにされており、得られた成果は普及段階にあるとともに、イチゴでは早期普及を目指している。

このほかにも、2010～2012 年に実施された農林水産省の「新たな農林水産政策を推進する実用技術開発事業：被害リスクに応じたウリ科野菜ホモプシス根腐病の総合防除技術の確立」では、岩手県農業研究センターによってキュウリホモプシス根腐病（病原菌：*Phomopsis sclerotioides*）を対象に本技術による被害軽減効果が明らかにされ、得られた成果は岩手県内お

よび東北各県で普及段階にある。

このように、野菜類土壌病害の被害軽減技術として転炉スラグを用いた土壌 pH 矯正を利用する取り組みは、東北地域では拡大しつつあり、全国的にも注目されている。ここでは、青森県内外の東北地域における本技術についての研究成果・利用事例を紹介する。

2. 野菜類土壌病害の被害軽減技術への転炉スラグの利用

(1) アブラナ科野菜根こぶ病

ハクサイ、キャベツ、カリフラワー、ブロッコリーをはじめ、京都府のスグキナ、三重県のヒノナなど、各種アブラナ科野菜の根こぶ病対策として、以前から日本各地で転炉スラグが利用されている¹⁾。

青森県では、2008年に平川市の現地農家圃場において、ハクサイ・ブロッコリー根こぶ病を対象に、転炉スラグ（商品名「てんろ石灰」（粉状品）、以下共通して本商品を使用）を用いた試験を行った。この圃場では、フルスルファミド粉剤を使っても根こぶ病が多発するような条件であったためか、圃場のみを対象に土壌 pH 矯正（矯正目標 pH7.5、30cm 深矯正）を行っても被害軽減効果は十分ではなかった。根を観察したところ、ハクサイでは pH 矯正区・未矯正区ともに「こぶ」の形成が著しくて気付かなかったが、ブロッコリーでは根鉢部分（＝育苗土 pH 未矯正）には「こぶ」の形成が多いのに対し、圃場中（＝pH 矯正実施）に伸びた根には「こぶ」の形成が少ないことがわかった。

そこで、2009年には、根こぶ病が多発する黒石市の所内圃場と弘前市の現地農家圃場において、ハクサイ・ブロッコリー根こぶ病を対象に、育苗土と圃場の両方の土壌 pH 矯正（矯正目標 pH7.5、圃場は 30cm 深矯正）による被害軽減効果を検討した。その結果、根全体の「こぶ」の量が大幅に減少し、高い良品率が得られるようになった²⁾（図1）。この所内根こぶ病試験圃場では、2010年にコカブを栽培したが、圃場の pH 矯正による被害軽減効果は高かった。

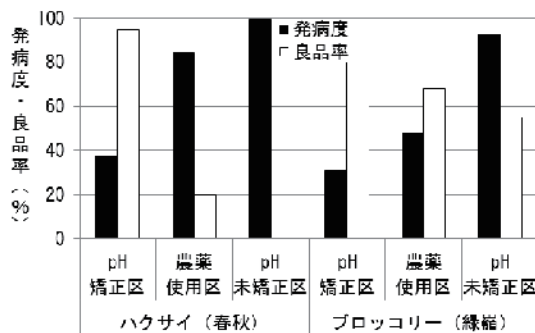


図1 育苗土と圃場の土壌 pH 矯正によるハクサイ・ブロッコリー根こぶ病の被害軽減効果 (2009年)

注) ハクサイ試験 (黒石市)
 pH矯正区: 育苗土pH7.4、圃場pH7.5
 農薬使用区・pH未矯正区: 育苗土pH6.3、圃場pH5.9
 ブロッコリー試験 (弘前市)
 pH矯正区: 育苗土pH7.4、圃場pH7.5
 農薬使用区・pH未矯正区: 育苗土pH6.3、圃場pH6.6
 良品率: L規格以上とした

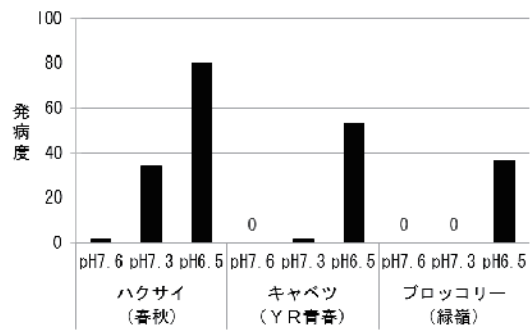


図2 育苗土の土壌 pH 矯正による育苗時の根こぶ病の被害軽減効果 (2008年)

注) pH7.3と7.6に矯正するために転炉スラグを使用

弘前市の現地農家圃場では、2010年秋には農家自ら 30a に転炉スラグを施用し、以後、アブラナ科野菜の栽培の際には育苗土の pH 矯正も実践されている。また、県内では、2015年に野

辺地町の「野辺地葉つきこかぶ」でも実証栽培が行われるようになった。県外では、2010年に岩手県岩手町の大規模キャベツ栽培2農家で、20haおよび50aで実証栽培が行われるとともに、2011年には後者で240aに拡大された。宮城県では、2015年に石巻市と栗原市のキャベツで、丸森町のブロッコリーで実証栽培が行われている。

なお、根こぶ病は育苗時にも発生することがあるため、2008年にハクサイ、キャベツ、ブロッコリーを使ったセルトレイ接種試験によって、育苗土の土壌pH矯正による被害軽減効果を検討したところ、育苗時の被害もまた軽減することができた³⁾ (図2)。

(2) 土壌伝染性のフザリウム病

青森県では2008年に、いくつかの土壌伝染性のフザリウム病を対象に、ポット接種試験によって土壌pHと発病の程度を比較するとともに、プランターや所内圃場を使っての土壌pHを高めた場合の各種作物の栽培試験から着手した。

2009～2010年にはメロンつる割病を対象に、つがる市の現地農家圃場(各年1か所)において育苗土と圃場の土壌pH矯正(矯正目標pH7.5、圃場は30cm深矯正)による被害軽減効果を検討し、効果が高いことを明らかにした⁴⁾ (図3)。なお、2010年に試験を行った現地農家圃場では、2011年春には農家自ら50aに転炉スラグを施用し、1回の土壌pH矯正で、2015年までに5年5作の栽培が続けられ、育苗土のpH矯正も実践されている。

キュウリつる割病については、2010～2011年に西北地域県民局地域農林水産部農業普及振興室による調査研究の一環として、鶴田町の現地農家圃場(各年1か所)において圃場の土壌pH矯正(矯正目標pH7.5、30cm深矯正)による被害軽減効果が検討され、効果が高いことが明らかにされた(図4)。鶴田町のJAつがるにしきた鶴翔きゅうり部会では、「こだわりきゅうり」として部会全体で自根栽培に取り組んでおり、近年、連作圃場ではキュウリつる割病の発生が著しい減収要因となっていた。以後、実践希望農家には、普及指導員によって適切な指導が実施されている。

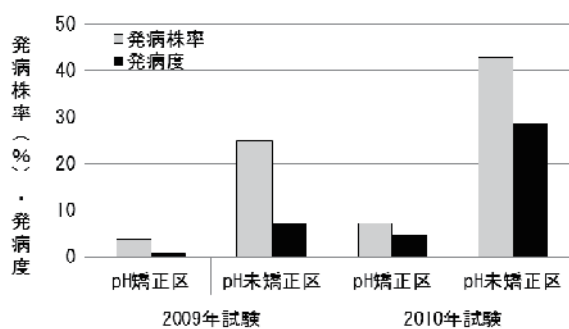


図3 育苗土と圃場の土壌pH矯正によるメロンつる割病の被害軽減効果

注) 2009年試験(つがる市①)
 pH矯正区: 育苗土pH7.4、圃場pH7.5
 pH未矯正区: 育苗土pH6.6、圃場pH6.8
 2010年試験(つがる市②)
 pH矯正区: 育苗土pH7.9、圃場pH7.8
 pH未矯正区: 育苗土pH6.4、圃場pH6.7
 品種: いずれも「タカミ(自根)」

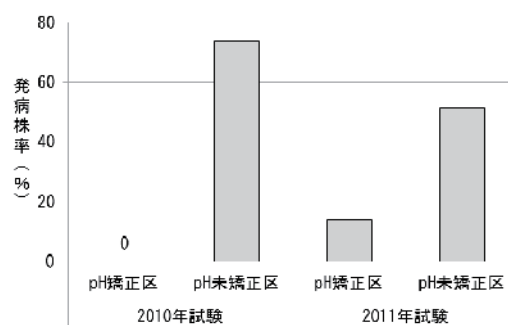


図4 圃場の土壌pH矯正によるキュウリつる割病の被害軽減効果

注) 2010年試験(鶴田町①)
 pH矯正区: pH7.3～7.8
 pH未矯正区: pH5.7～5.9
 2011年試験(鶴田町②)
 pH矯正区: pH7.4～7.9
 pH未矯正区: pH6.8～6.9
 品種: いずれも「夏のみぐみ(自根)」

レタス根腐病については、2011～2014年に弘前市の現地農家圃場において、圃場の土壌pH矯正(矯正目標pH7.5、30cm深矯正)と、これに併用するいくつかの耕種的方法についての検

討を行った。その結果、圃場の土壌 pH 矯正と耐病性を有する品種の併用⁵⁾に、さらにペーパーポット育苗を併用⁶⁾することで、これまでの慣行栽培方法に比べて根腐病の被害を効果的に軽減することができ、収量が大幅に向上することを明らかにした(図5)。この圃場では、2015年にも春作と秋作の2作で3つの耕種的方法を併用した栽培試験を行ったが、いずれも高い被害軽減効果が得られた。なお、レタスでは、育苗土の pH 矯正を併用することも検討したが、育苗土の種類や育苗時期によって育苗中の生育が悪くなるがあったため、pH 矯正は行わないこととした。

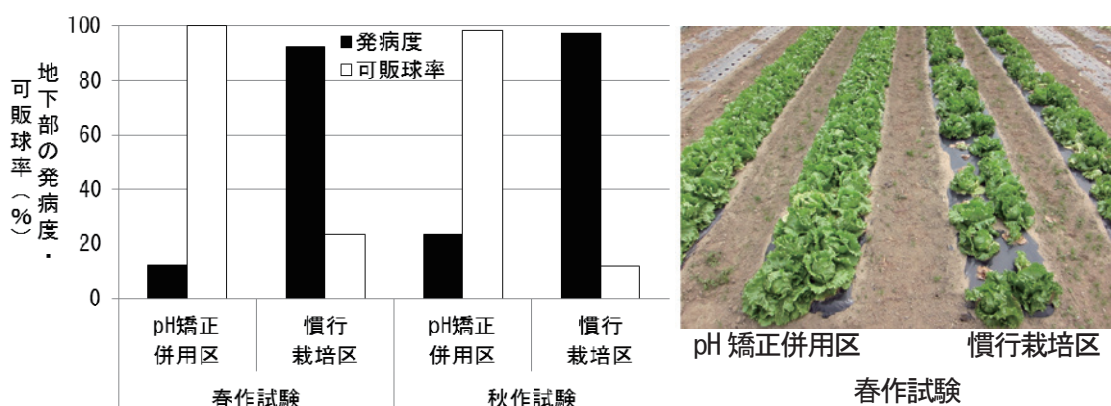


図5 圃場の土壌 pH 矯正、品種の耐病性およびペーパーポット育苗を併用したレタス根腐病の被害軽減効果 (2014年)

注) 春作試験

pH矯正併用区：圃場pH7.4、品種「ラプトル」、ペーパーポット育苗
 慣行栽培区：圃場pH6.1、品種「サウザー」、セルトレイ育苗

秋作試験

pH矯正併用区：圃場pH7.3、品種「ラプトル」、ペーパーポット育苗
 慣行栽培区：圃場pH6.2、品種「サウザー」、セルトレイ育苗

可販球率：調製重が300g以上で、調製切断面が本病で褐変していない球の割合

岩手県では、ハウレンソウ萎凋病を対象に、2009～2010年に岩手県農業研究センター内ハウスにおいて、土壌 pH 矯正 (矯正目標 pH7.5、10cm 深矯正) による被害軽減効果が高いことが明らかにされた⁷⁾。2011年からは各地域普及センターとの連携試験により、現地農家圃場でも高い被害軽減効果が認められ⁸⁾、久慈市、軽米町、岩手町、八幡平市、遠野市等のハウレンソウ産地において積極的に本技術の導入が図られている。ただし、高 EC 土壌では、転炉スラグ処理によってハウレンソウの生育抑制が助長される場合があるので、本技術の導入の際には、土壌分析結果に基づいて土づくりを正しく行う必要があるとしている。岩手県の成果を受け、青森県でも2015年から黒石市の準高冷地におけるハウス栽培ハウレンソウで、少なくとも69a(実面積の1/3程度)で本技術が導入されている。

宮城県では、イチゴ萎黄病を対象に、2012～2014年に宮城県農業・園芸総合研究所内ハウスにおいて、プランター試験によって菌密度、土壌 pH、イチゴ品種の組み合わせによる発病程度の比較が行われるとともに⁹⁾、ドレンベッド試験によって土壌 pH 矯正 (矯正目標 pH7.5、10cm 深矯正) と耐病性品種「もういっこ」を併用することで被害軽減効果が高いことが明らかにされた¹⁰⁾。このイチゴ萎黄病に対する被害軽減効果は、砂壤土よりも pH 矯正効果の持続性の高い埴土で高かった¹⁰⁾。福島県でも、2012～2014年にイチゴ萎黄病を対象に、福島県農業総合センター内ハウスでのプランター試験や現地農家圃場試験によって、転炉スラグの造粒品 (粒状) よりも粉状品 (粉状) の方が pH 矯正効果は高く、被害軽減効果も高いことを明らかにしてい

る。ただし、萎黄病に対する感受性が高い「とちおとめ」では、土壌 pH 矯正単独ではクロロピクリンくん蒸剤のような高い防除効果は期待できないため、他の防除方法と併用する必要があることを指摘している。なお、福島県では、粉状の転炉スラグを用いた土壌 pH 矯正によって萎黄病の被害を軽減するためには、感染苗が移植された場合には効果が低いいため、健全苗の確保・移植が重要であることを述べている¹¹⁾。宮城・福島両県の成果を受け、青森県でも 2015 年から五所川原市と田舎館村の夏秋イチゴ栽培ハウスの一部で、試験的に本技術が導入されている。

その他の土壌伝染性のフザリウム病に対しても、転炉スラグを用いた土壌 pH 矯正による被害軽減効果が高いことは、東京農業大学によってセルリー萎黄病（病原菌：*F. oxysporum* f. sp. *apii*）¹²⁾やタイサイ萎黄病（病原菌：*F. oxysporum* f. sp. *conglutinans*）などで明らかにされ、静岡県内では既に本技術が導入されている。

（3）その他の土壌伝染性病害

青森県では、黒石市の所内圃場で 2007 年秋から転炉スラグを用いて土壌 pH 矯正（矯正目標 pH7.5、30cm 深矯正）を行った場合のニンニク栽培試験を開始し、2010 年秋からはつがる市の現地農家圃場においても同様の栽培試験を開始している。生育や収量に悪影響がないことは既に確認済みである。なお、つがる市の現地農家圃場では、2015 年秋の時点で 30a に転炉スラグが利用されている。一方、ニンニクの土壌伝染性病害¹³⁾に対しては、黒腐菌核病では 2010、2013、2014 年植え付けによるワグネルポットまたはプランター接種試験（pH6.5、7.5、7.7 程度の 3 段階）を行うとともに、2014 年植え付けによる圃場試験（矯正目標 pH7.5、30cm 深矯正）を行い、土壌 pH 矯正単独よりも既存技術である種子消毒（チウラム・ベノミル水和剤による湿粉衣）との併用で被害軽減効果が高いことを明らかにした。紅色根腐病では 2013、2014 年植え付けによるプランター接種試験（pH6.5、7.5、7.7 程度の 3 段階）を行うとともに、2014 年植え付けによる圃場試験（矯正目標 pH7.5、30cm 深矯正）を行い、土壌 pH 矯正によって被害が軽減されるとともに、圃場での緑肥（スダックス）の併用で被害軽減効果が向上することを明らかにした。得られた成果については、2016 年度からの普及を目指している。

東北農業研究センターでは、トマト青枯病を対象に、転炉スラグを用いて土壌 pH 矯正（矯正目標 pH7.5、10cm 深矯正）を行うことで被害を軽減でき、自根栽培の場合、耐病性の強い品種との併用で被害軽減効果が向上することを 2013～2014 年に盛岡市のセンター内圃場で明らかにしている¹⁴⁾。2015 年には、東北農業研究センターと農林総合研究所の共同研究により、転炉スラグを用いた土壌 pH 矯正と耐病性台木への接ぎ木とを併用することで、被害軽減効果がさらに向上することが、黒石市の所内圃場（矯正目標 pH7.5、20cm 深矯正）（図 6）と弘前市の現地農家圃場（矯正目標 pH7.5、15cm 深矯正）で明らかにされている¹⁵⁾。青森県では、東北農業研究センターの成果を受け、2014 年から五所川原市のトマト栽培ハウスの一部で、試験的に本技術が導入されているが、得られた成果については、2016 年度からの普及を目指している。

岩手県では、キュウリホモプシス根腐病を対象に、2009～2012 年に岩手県農業研究センター内ハウスでの接種試験による検討や花巻市と遠野市等での現地試験（矯正目標 pH7.5、10cm 深矯正）が行われ、本病抵抗性の強い「パワー Z 2」台木と「黒ダネ南瓜」台木を使うとともに転炉スラグを用いて土壌 pH 矯正を行うことで、実用的な被害軽減効果が得られることが明らかにされた^{16、17)}。本技術は岩手県内および本病が発生している東北各県で実用化が進んでいる。

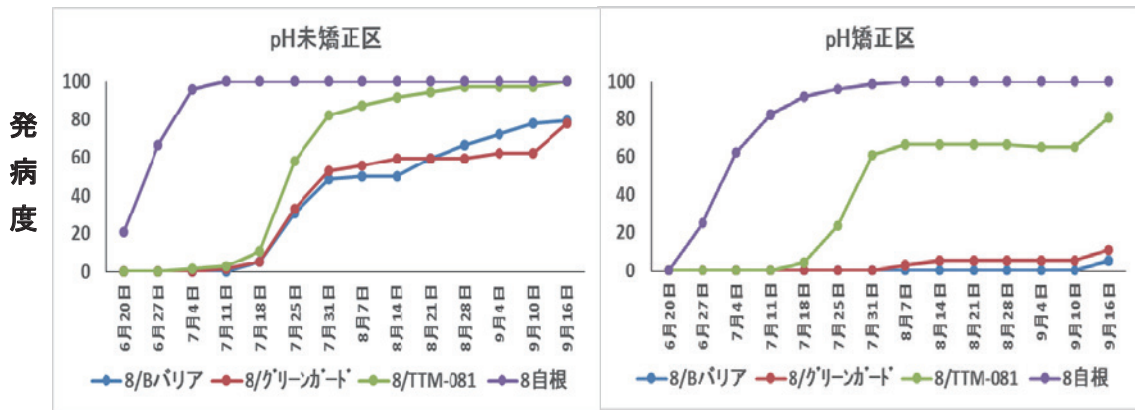


図6 土壌pH矯正と耐病性台木への接ぎ木とを併用したトマト青枯病の被害軽減効果（2015年）

注) pH矯正区：pH7.4 pH未矯正区：pH5.8

8：「桃太郎8」の略

「Bバリア」と「グリーンガード」：青枯病耐病性が強い台木

3. おわりに

以上で取り上げた各病害の被害軽減技術に共通して、土壌pH矯正を行う際の矯正目標pH(育苗土の場合も含む)は7.5程度である。pH矯正する深さについては、病害(作物)の種類によって異なるとともに、被害軽減効果や高pH状態の持続期間に影響していることが考えられるので、それぞれの研究機関等で示されている研究成果を参考にする。また、転炉スラグの施用量は一律ではなく、pH矯正する前の圃場(育苗土)のpHや、土壌の種類、矯正する深さによって大きく異なる。青森県内での試験例では、砂土では少量(深さ30cmの矯正で、通常、10アール当たり1t程度)で済んだが、黒ボク土では大量(同、10t程度以上)に必要とし、灰色低地土や褐色森林土、グライ土ではこれらの中間以下(同、3~4t程度)であった。いずれにせよ、必ず、緩衝能曲線というグラフを作成し、その結果に基づいて施用量を決定するとともに、この時点で、施用量とコスト面から、本技術を導入するかどうかの判断を行う必要がある。

なお、本技術の骨格は、あくまでも土壌pH矯正という耕種的方法の一種であるため、土壌pH矯正単独では十分な被害軽減効果が得られない場合もある。その要因として、「菌密度が高い(発病程度が高い)」、「作物や品種が病気に罹りやすい」、「気・地温が発病に好適である(最も発病しやすい時期である)」、「pH矯正ムラがある(pH7.5程度まで達していない)」、「排水性が悪い(灌水量が多い)」、「リン酸等の土壌養分が過剰である」、「他の病害が発生(混発)している」等が考えられる。そういう場合には、栽培環境・方法の改善や、実情にあわせてこれらの要因を改善するための他の耕種的・物理的方法との併用、時には農薬との併用も考慮する必要がある。

最後に、(地独)青森県産業技術センター農林総合研究所では、本技術に関する知識の共有と早期普及・拡大を目指して、2015年9月8日に「転炉スラグ活用技術研究会」を発足させ、行政・普及指導機関、JA、農家、転炉スラグ生産メーカー、試験研究機関を参集範囲として、研修会や現地検討会等の活動を展開中である。

4. 引用文献

1. 後藤逸男・村上圭一 (2006)、おもしろ生態とかしこい防ぎ方 根こぶ病、農山漁村文化協会、東京、pp. 77-106
2. 岩間俊太・今井照規・鈴木千秋 (2011)、育苗土と圃場の土壌酸性改良によるブロッコリー・ハクサイ根こぶ病の被害軽減、北日本病虫研報 62:207 (講要)
3. 岩間俊太・今井照規 (2009)、ホタテ貝殻焼成カルシウムおよび転炉スラグ施用による育苗時のアブラナ科野菜根こぶ病の発病抑制効果、北日本病虫研報 60:287 (講要)
4. 岩間俊太・今井照規・鈴木千秋 (2010)、転炉スラグを用いた土壌酸性改良によるメロンつる割病の被害軽減、北日本病虫研報 61:268 (講要)
5. 岩間俊太・倉内賢一・門田育生 (2014)、転炉スラグを用いた土壌 pH 矯正と品種耐病性の併用によるレタス根腐病の被害軽減効果、北日本病虫研報 65:85-92
6. 岩間俊太・谷川法聖・倉内賢一・門田育生 (2015)、転炉スラグを用いた土壌 pH 矯正に品種の耐病性およびペーパーポット育苗を併用したレタス根腐病の被害軽減効果、日植病報 81:258 (講要)
7. 岩館康哉 (2012)、転炉スラグを用いた土壌 pH 改良によるハウレンソウ萎凋病の発病抑制、土と微生物 66:80 (講要)
8. 岩館康哉 (2014)、転炉スラグを用いた土壌 pH 改良によるハウレンソウ萎凋病の被害軽減効果、日植病報 80:68 (講要)
9. 辻 英明・玉手英行・関根崇行・近藤 誠 (2014)、土壌中のイチゴ萎黄病菌密度と転炉スラグを用いた土壌 pH 矯正による発病抑制効果の関係、北日本病虫研報 65:198 (講要)
10. 大場淳司・関根崇行・辻 英明・村主栄一・近藤 誠・玉手英行・(2015)、転炉スラグと耐病性品種の併用によるイチゴ萎黄病の発病抑制効果、北日本病虫研報 66: (講要、印刷中)
11. 鈴木洋平・宍戸邦明・山田真孝・岡崎一博 (2012)、転炉スラグ資材を用いた土壌 pH 矯正がイチゴ萎黄病の発生に与える影響、北日本病虫研報 63:100-103
12. 大島宏行・高倉克弥・後藤逸男 (2013)、セルリー萎黄病の総合防除対策 (その 4) - 転炉スラグを用いた土壌酸性改良によるセルリー萎黄病の防除 -、土肥要旨集 59:49 (講要)
13. 岩間俊太 (2015)、転炉スラグを用いた土壌 pH 矯正によるニンニク黒腐菌核病および紅色根腐病の被害軽減の可能性、北日本病虫研報 66: (講要、印刷中)
14. 門田育生・今崎伊織 (2015)、転炉スラグを原料とした石灰肥料の土壌施用によるトマト青枯病の発病抑制、日植病報 81:59-60 (講要)
15. 門田育生・岩間俊太 (2016)、転炉スラグ施用による土壌 pH 矯正と耐病性台木への接木とを併用したトマト青枯病の発病抑制、日植病報 82: (講要、印刷中)
16. 岩館康哉・猫塚修一 (2010)、転炉スラグ資材施用によるキュウリホモプシス根腐病の発病抑制効果、日植病報 76:153 (講要)
17. 岩館康哉 (2014)、岩手県におけるキュウリホモプシス根腐病の発生生態と防除に関する研究、岩手農研セ研報 13:69-160

転炉スラグ施用時の肥培管理と復田した場合の影響

谷川 法聖

(地独) 青森県産業技術センター農林総合研究所

1. はじめに

フザリウム性土壌病害の被害軽減対策として、転炉スラグ資材を使った土壌 pH 矯正が効果的であることが明らかにされている^{1),2)}。石灰資材を施用して土壌 pH を高めると、微生物による土壌有機物の分解が促進され、地力窒素の発現量が一時的に増加する「アルカリ効果」という現象が起こる。一方で、地力窒素の無機化が長く続く場合には、土壌有機物が消耗し、地力窒素が徐々に減少していくことが懸念される³⁾。そこで、レタス栽培において pH を 7.5 に矯正した場合に窒素減肥栽培が可能かどうか、高 pH 条件を続けた場合に土壌有機物や地力がどう変化するかを検討した。

また、本技術を利用し pH 矯正した圃場を何らかの理由で水田に復田する場合を想定し、復田した場合の水稲生育や病害発生に及ぼす影響を検討した。

2. pH矯正によって起こる地力窒素の増加

pH 矯正によって土壌からの地力窒素発現量がどのように変化するか明らかにするために、2種類の土壌（褐色低地土、黒ボク土）に段階的に転炉スラグを混ぜて pH を変化させ、30℃の一定温度で畑培養し、無機態窒素量を経時的に調査した。

褐色低地土、黒ボク土ともに、pH が高まるほど無機態窒素量が増え、pH 矯正によって地力窒素発現量が増加する「アルカリ効果」が確認された。pH7.5 付近に矯正した処理区で見ると、褐色低地土の無機態窒素量は未矯正の 2.0 倍に、黒ボク土は 1.6 倍に増加し、地力窒素の増加割合は土壌によって異なった。地力窒素の増加程度は、土壌有機物量や矯正前の pH によって異なると考えられる。

3. 地力変化に応じた施肥管理法（レタス栽培の事例）

転炉スラグによる pH 矯正によって地力窒素発現量の増加が見込まれることから、2012～2014 年に研究所内の転炉スラグ施用後年数の異なる 2 圃場（圃場 A、B）において、窒素減肥を行っても慣行栽培並みの収量を確保できるか検討した。圃場 A の矯正区は 2012 年 8 月に転炉スラグを 3.6t/10a、圃場 B の矯正区は 2009 年 8 月に転炉スラグを 4.5t/10a 施用して、pH7.5 を目標に矯正した。圃場 A の矯正区の窒素施肥量は標準施肥、25%減肥、50%減肥の 3 水準、圃場 B の矯正区の窒素施肥量は標準施肥量、25%減肥の 2 水準とし、両圃場の未矯正区は標準施肥とした。2012 年は秋作、2013 年は春作、2014 年は春作と秋作にレタスを栽培し、各試験区の収量と養分吸収量を調査した。標準施肥量（窒素-リン酸-カリ）は、2012 年は 20-19-20kg/10a、2013～2014 年は 20-29-20kg/10a とし、各減肥区は窒素成分のみ減肥した。

圃場 A では、転炉スラグ施用後 1 年目および 2 年目においては、矯正区の窒素吸収量を 25%

減肥あるいは50%減肥しても、慣行栽培体系である未矯正区標準施肥以上の収量が得られた(図1)。施用後3年目は、窒素減肥すると収量が未矯正区標準施肥を下回る場合があり、収量が不安定になる傾向が見られた。圃場Bでは、施用後4年目と6年目の矯正区の収量は未矯正区標準施肥よりも高かったが、施用後5年目では同等であった。圃場Bの未矯正区は、水はけの悪い場所に位置しており、過湿状態のことが多かったため、収量を過小評価している可能性が考えられた。

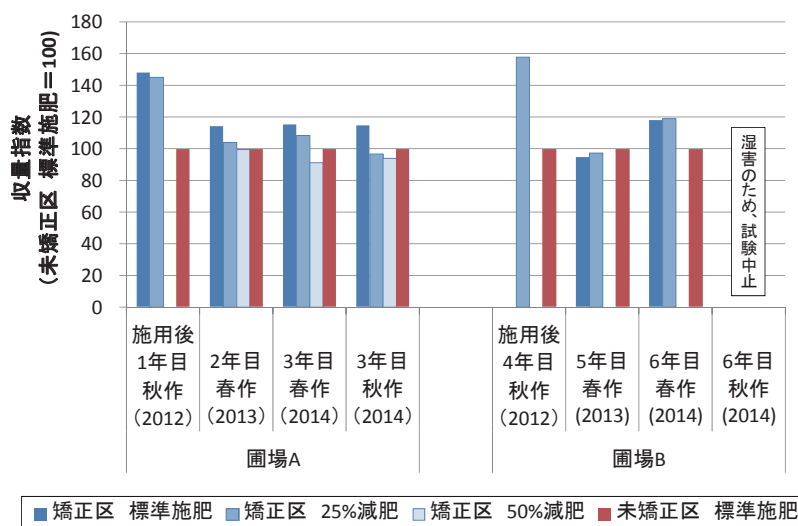


図1 レタスの減肥試験の収量の推移

(注)収量指数は、各年次の未矯正区標準施肥の収量を100とした時の、各試験区の収量を示す。

養分吸収量を見ると、施用後1年目あるいは2年目は転炉スラグ施用によって地力窒素発現量が増加したことで矯正区標準施肥の窒素吸収量は未矯正区標準施肥よりも多かった。しかし、3年目以降は同等であり、アルカリ効果による地力窒素増加の影響は、転炉スラグ施用から2年程度の比較的短期的なものと考えられた。矯正区25%減肥および50%減肥の窒素吸収量は、施用後2年目から未矯正区標準施肥を下回った。矯正区のリン酸吸収量とカルシウム吸収量は、いずれの年次でも未矯正区よりも多くなっており、地力窒素発現量の増加以外に、転炉スラグに含まれるリン酸やカルシウムの吸収量が増加したことも、レタス生育に対してプラスの効果があったと考えられる。

収量および養分吸収量の結果から、転炉スラグ施用後2年程度はアルカリ効果によって地力窒素発現量が増加するため、レタス栽培において窒素施肥量を25~50%減肥しても慣行栽培並みの収量が得られることが明らかとなった。3年目以降はアルカリ効果が見られず、窒素減肥すると窒素吸収量が減少し、収量が不安定になると考えられた⁴⁾。

転炉スラグ施用後2年程度はpH矯正によって地力窒素発現量が増える一方で、圃場Aにおいて年あたりの土壌の炭素含有率の減少量は、未矯正区よりも矯正区で大きい傾向が見られ、土壌有機物の消耗は転炉スラグ施用により速まると考えられた。持続的な土づくりのためには、堆肥や緑肥などの有機物の施用が必要であると考えられる。

4. pH矯正圃場を復田した場合の水稲栽培

pH矯正圃場を何らかの理由で復田した場合に高pH条件において水稲栽培が可能か検討する

ために、畑地期間に転炉スラグを施用した後に復田した矯正区と、同様の作付け体系で慣行栽培を行う未矯正区を設け、水稻生育や病害発生状況を比較した（試験1）。また、転炉スラグ施用直後の水稻作への影響を検討するため、水稻連作圃場において pH を 7.5 程度に高めた矯正区と未矯正区の水稲生育や病害発生状況を比較した（試験2）。圃場来歴および試験区の構成は表1及び表2の通りである。

表1 試験1の圃場来歴および試験区の構成

区名	年数 (年次)	(2008)	(2009)	復田 1年目 (2010)	復田 2年目 (2011)	復田 3年目 (2012)	復田 4年目 (2013)	復田 5年目 (2014)
	作付品目	メロン・スイカ	メロン	水稻	水稻	水稻	水稻	水稻
矯正区	土壌改良	転炉スラグ (3.6t/10a)	なし	なし	転炉スラグ (1.2t/10a)	なし	なし	なし
	目標pH	7.5	—	—	7.5	—	—	—
	実測pH	7.1~7.3	7.4~7.5	7.2~7.6	7.6~8.0	7.1~7.5	7.1~7.5	7.0~7.3
	施肥	慣行	慣行	なし	窒素 2.5+0.7kg/10a	窒素 6+2kg/10a	窒素 6+2kg/10a	窒素 6+2kg/10a
未矯正区	土壌改良	苦土石灰 (380kg/10a)	苦土石灰 (100kg/10a)	なし	—	なし	なし	なし
	目標pH	6.5	6.5	—	—	—	—	—
	実測pH	6.2~6.4	5.9~6.4	6.0~6.5	6.3~6.7	5.7~6.6	5.9~6.4	5.8~6.0
	施肥	慣行	慣行	なし	窒素 2.5+0.7kg/10a	窒素 6+2kg/10a	窒素 6+2kg/10a	窒素 6+2kg/10a

表2 試験2の圃場来歴および試験区の構成

区名	年数 (年次)	(2011)	施用 1年目 (2012)	施用 2年目 (2013)	施用 3年目 (2014)
	作付品目	水稻	水稻	水稻	水稻
矯正区	土壌改良	なし	転炉スラグ (3.6t/10a)	なし	なし
	目標pH	—	pH7.5	—	—
	実測pH	—	7.4~8.7	7.4~7.7	7.4~7.6
	施肥	窒素 4+2kg/10a	無窒素	窒素 4+2kg/10a	窒素 6+0kg/10a
未矯正区	土壌改良	なし	なし	なし	なし
	目標pH	—	—	—	—
	実測pH	—	pH5.5~6.1	pH5.6~7.2	pH5.4~7.1
	施肥	窒素 4+2kg/10a	無窒素	窒素 4+2kg/10a	窒素 6+0kg/10a

1) 土壌 pH の推移とアルカリ効果の発現状況

試験期間（2012～2014年）の試験1の矯正区の pH は平均 7.3 で、未矯正区は 6.5 であった。同様に、試験2の矯正区の pH は平均 7.7 で、未矯正区は 6.2 であった。試験1、2ともに未矯正区において、湛水期間中は土壌還元に伴い pH が高まる傾向が見られ、pH7 付近まで高まることがあった。矯正区は、試験期間を通して概ね pH7.5 の高 pH を維持していた。

移植約1か月後の6月中旬の作土中のアンモニウム態窒素量をみると、試験1では矯正区と未矯正区で大きな違いはなかったが、試験2では転炉スラグ施用後1年目と2年目にアルカリ効果による窒素発現量の増加が見られた。このことから、転炉スラグによる酸性矯正から2年程度はアルカリ効果の影響があるが、3年目以降は酸性矯正を行わない圃場と地力窒素発現量は同程度になると考えられた。

2) 収量・品質・食味への影響

水稻の好適 pH は 5.5～6.0 とされているが、試験1、試験2の矯正区の pH は 7.5 程度に高まっていたものの、高 pH で発生しやすい微量要素欠乏の生理障害は見られず、生育に支障はな

かった。

試験1の矯正区の収量は、未矯正区と同等か年次によっては上回る年もあり、転炉スラグによるpH矯正を行った畑圃場を復田しても慣行栽培並みの水稻収量が得られた(図2)。転炉スラグ施用直後に水稻を作付けした試験2の施用後1年目では、アルカリ効果による地力窒素の発現量増加の影響で、無窒素栽培としたにも関わらず初期から生育は旺盛で、収量は地域の平均収量(600kg/10a)に近い収量が得られた。施用後2年目は基肥の窒素施肥量を概ね半量、施用後3年目は慣行施肥量としたところ、矯正区の収量は施用後2年目が未矯正区比90%で少なく、施用後3年目は矯正区比110%と多くなった。試験2では施用後2年目と3年目で収量の傾向が逆転し、転炉スラグ施用による一定の傾向はなかった。試験期間を通してみると、矯正区と未矯正区で収量水準に大きな違いはなく、高pH条件においても水稻栽培に大きな支障はないと考えられた。等級検査や食味官能検査については、矯正区と未矯正区で違いはみられなかった。

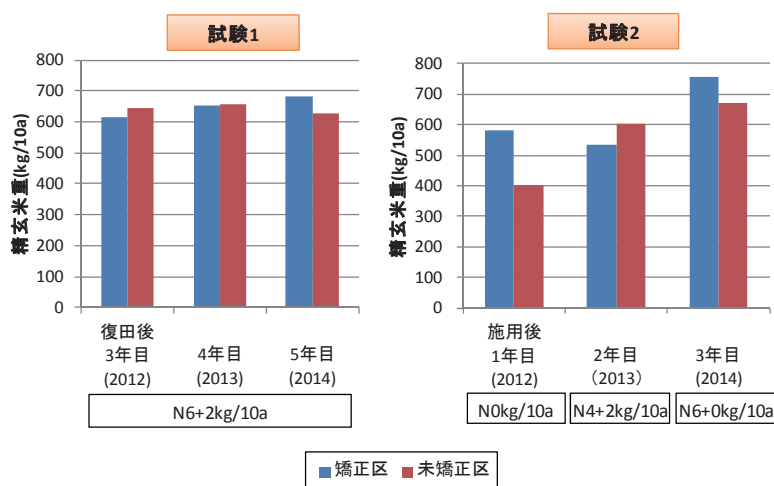


図2 試験1および試験2の水稻収量

3) 水稻病害への影響

試験1においてイネいもち病および紋枯病への影響を調査した。

いもち病では、品種は「ゆめあかり」(いもち病抵抗性は葉:中、穂:やや弱)、「つがるロマン」(いもち病抵抗性は葉:やや強、穂:中)を用いた。葉いもちは、矯正区は未矯正区に比べ、同等からやや少ない傾向であった。一方、葉いもち発病株率が未矯正区と同等に多い年も見られた(図3)。穂いもちの発生は矯正区と未矯正区に有意差は見られなかった。

紋枯病は復田5年目の事例のみだが、発生に有意差は見られなかった。

以上のことから、これらに対する防除対策は、通常の復田における対策と同様と考えられた⁵⁾。

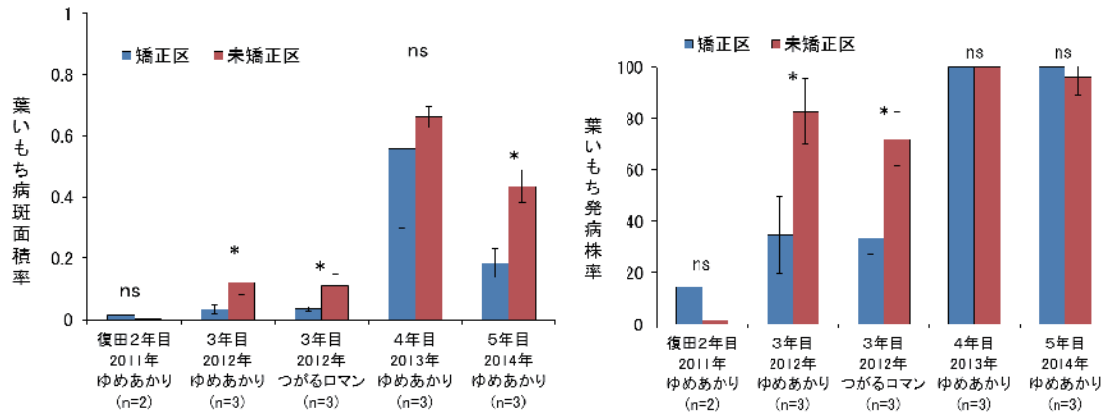


図3 葉いもちの発生状況

(注) 接種条件：6月下旬、または7月上旬に罹病苗を移植し伝染源とした。

図中のバーは標準偏差。*：Mann-WhitneyのU検定による有意差 ($p < 0.05$) あり。ns：有意差なし。

5. おわりに

土壌病害被害軽減対策として土壌 pH を 7.5 に矯正することは、これまでの土壌改良目標値よりも高く、pH 矯正によって土壌、特に地力窒素に対しての影響が懸念されていた。今回の試験では、施用後 2 年程度は地力窒素発現量が増加し減肥栽培が可能となること、土壌有機物が消耗しやすくなるため有機物の施用が望ましいことが明らかとなった。転炉スラグによる pH 矯正時の減肥量は、土壌の種類や作目によって異なると考えられるため、減肥栽培の事例の蓄積が今後の課題である。

また、pH 矯正した圃場を復田した場合には、高 pH であっても水稻栽培に支障はなく、慣行栽培並みの収量が得られることが明らかとなり、野菜と水田を組み合わせた輪作体系でも、転炉スラグを用いた土壌 pH 矯正によるフザリウム性土壌病害被害軽減対策に取り組むことが可能と考えられた。

6. 引用文献

1. 岩間俊太・倉内賢一・門田育生 (2014)、転炉スラグを用いた土壌 pH 矯正と品種耐病性の併用によるレタス根腐病の被害軽減効果、北日本病害虫研報 65:85-92
2. 岩館康哉 (2014)、転炉スラグを用いた土壌 pH 改良によるハウレンソウ萎凋病の被害軽減効果、日植病報 80:68 (講要)
3. 藤原俊六朗・安西徹郎・小川吉雄・加藤哲郎 (2010) 新版土壌肥料用語事典第 2 版:83-84、農文協
4. 谷川法聖 (2015)、レタス根腐病被害軽減を目的とした転炉スラグ施用時の肥培管理法、東北農業研究 68：(印刷中)
5. 倉内賢一・谷川法聖・清藤文仁・岩間俊太・門田育生 (2015)、転炉スラグ施用後の高 pH 圃場を復田した場合のイネ病害の発生に及ぼす影響、北日本病害虫研報 66：(講要、印刷中)

栽培農家での利用の現状と課題

高倉 克弥

とびあ浜松農業協同組合

1. はじめに

当組合は静岡県最西部に位置しており、温暖な気候に恵まれて、特色のある多彩な農業が行われている。しかし、多くの品目にてフザリウム病が原因となる土壌病害が多発し問題となっていた。特に、主要品目であるセルリーにおける萎黄病の発病が顕著となっていた。当時は原因が分からず、栽培を辞めたり品目転換する生産者もいた。そこで、2004年から東京農業大学 生産環境化学研究室（以下土壌学研究室）の協力を仰ぎ現地での対策試験を開始した。



図1 2004年のセルリー萎黄病の発病状況

写真はどちらもセルリー萎黄病の発病圃場。圃場全体で被害が多発している（収穫皆無）。

2. 栽培農家での取り組み

土壌学研究室の調査結果から、セルリー萎黄病は、連作によってフザリウム菌密度が高くなっていること、リン酸過剰であること、土壌pHが低いことが大きな要因であった。そこで、土壌学研究室と現地試験圃場を設置して土壌消毒方法の改善や施肥改善、緑肥の導入を行った。土壌消毒は、セルリー不作付けの夏期にハウスを閉め切ることによる太陽熱を利用した土壌消毒を行った。

農家へは報告会での説明の他に個別訪問を行い土づくりに対する理解を高めた。施肥改善については、多くの農家が使用していた配合肥料の設計（N-P-K 8-6-7から8-1-4へ）を変更し、リン酸を削減する施肥体系とした。また、酸性改良には転炉スラグを用いて緩衝能曲線に基づいてpH6.5目標に施用を行った。

表1 2004年セルリー圃場調査時の土壌化学性と *Fusarium* 属菌数

発病度	pH (H ₂ O)	水溶性	可給態	NO ₃ -N mg/100g	<i>Fusarium</i> 属菌 (cfu/g乾土)
		P ₂ O ₅ mg/100g			
-	6.9	78.2	754	89.0	1.8E+03
-	6.8	35.6	181	6.8	6.6E+03
-	6.5	37.1	415	19.0	N. D.
+	6.3	29.2	155	5.6	6.3E+02
+	6.3	55.0	602	14.8	1.3E+03
-	6.2	34.7	423	1.9	4.0E+03
+	6.0	49.8	438	5.5	1.1E+03
+	5.9	51.7	366	4.2	1.6E+02
++	5.9	58.6	391	39.6	1.9E+04
++	5.9	52.1	400	5.0	6.6E+03
+	5.8	45.3	339	20.6	9.9E+03
++	5.8	44.3	400	1.9	8.6E+02
-	5.7	51.0	482	1.1	3.8E+01
++	5.4	45.7	288	0.7	1.2E+04
+	5.3	54.0	359	13.1	9.9E+03

調査10件の調査結果

発病度：-なし +圃場一部にて発病 ++圃場全体で発病

3. 取り組み結果と改善策

上記の対策を行った結果、セルリー萎黄病の発生は大幅に抑制された。(図2)しかし、地温の上がりにくいハウス内の樋下や入口付近では萎黄病が発生してしまったため(図3) 土壌消毒効果の出にくい箇所には薬剤を併用し効果を高めた。



図2 試験圃場の試験前と試験実施後の状況

2004年(写真左)は萎黄病で全滅、2005年(写真右)は萎黄病対策を講じて萎黄病の発生はなかった同一圃場



図3 樋下での萎黄病の発生状況

ハウスの影となり地温が上がりにくい、太陽熱消毒の効果が出にくい。

写真では分かりにくいですが、樋下の1列は萎黄病によって生育が悪い。

4. 課題と対策

セルリー萎黄病対策として土壌消毒の徹底、施肥改善、緑肥の導入、酸性改良に取り組んだ結果、萎黄病の発病は大幅に抑制された。しかし、生育が良好になり過ぎることによる生理障害が多発した。原因は明らかになっていないが、pHを6.5まで改良する場合には養分吸収に応じた施肥体系を併せて実施することが必要であると考えられた。特に土壌消毒と酸性改良を併せて行う場合には注意が必要である。施肥改善の取り組み当初は、施肥削減に重点を置いていたが、生理障害対策として養分吸収に基づく施肥が必要であったため、生育ステージごとの養分吸収量を調査した。全農の施肥名人によるシミュレーションを行い、養分吸収量に基づく施肥設計を作成した(図4)。生理障害を恐れて酸性改良に踏み切れない農家もいる。

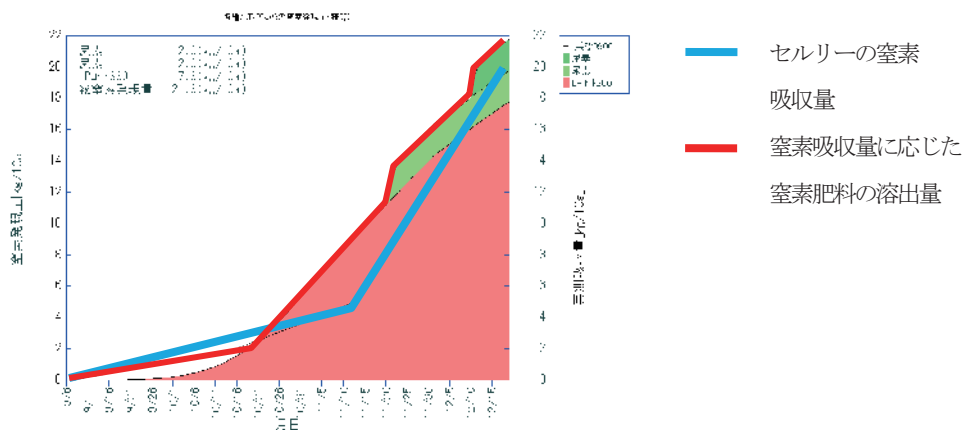


図4 シミュレーションに基づく施肥(全農 施肥名人)

定植9月6日、収穫12月20日で算出

以前は、セルリーの窒素吸収量の少ない定植後半に肥料が溶出していたが、シミュレーション施肥では、後半に溶出量が増加している

5. 今後の課題

セルリーのように、土壌消毒と酸性改良を行う場合の1年目は特に注意が必要である。大幅な施肥削減が求められるが、施肥削減による品質低下を恐れるために取り組みに消極的な農家もいる。また、酸性改良を行う場合には併せて施肥改善や生理障害対策を考える必要がある。

転炉スラグは多量施用となる場合が多いため、散布にはライムソワー等の農機具が必要となる。しかし酸性改良持続効果が高いため、一度施用すると数年まで散布の必要がない。そのため、ライムソワー等の農機具は個人で所有するのではなくリース事業等に対応する必要がある。

6. おわりに

栽培農家に取り組んでもらうためには研究機関との協力の下、現地試験を実施し、結果等を咀嚼して農家に説明し理解を得ることが重要である。また、酸性改良だけですべてを解決できる訳ではないため、輪作の実施や施肥改善等の正しい土づくりの理解と実践が重要である。

被害軽減機構解明の試み

門田 育生

農研機構東北農業研究センター

1. はじめに

耕地の酸性化が進むと作物の生育が抑制されるため、消石灰や炭酸カルシウムなどを主成分とする石灰肥料を施用することにより土壌の酸性改良が従来から実施されている。一方、土壌病害の発病に土壌 pH が関与していることも知られており、石灰肥料を施用して土壌の酸性改良を行うと被害が軽減される病害（キュウリつる割病、トマト萎凋病、アブラナ科野菜根こぶ病など）と、増大する病害（ジャガイモそうか病、バーティシリウム属菌による半身萎凋病など）があるとされる¹⁾。これらの中で、特にフザリウム属菌による土壌病害については、土壌 pH が高くなるにつれて発生が少なくなる傾向があることが 1950 年代から報告されるようになった²⁾。また、農林水産業・食品産業科学技術研究推進事業で実施された「転炉スラグによる土壌 pH 矯正を核としたフザリウム性土壌病害の耕種的防除技術の開発（課題番号 24015）、2012～2014 年度」では、転炉スラグで土壌 pH を 7.5 程度に矯正するとフザリウム病の被害が顕著に軽減されることが実証されている³⁾。

ここで、土壌伝染性のフザリウム病がなぜ土壌 pH を上げることにより被害が軽減されるかについては、具体的な作用機構に関する報告はほとんどない。そこで、被害軽減機構を解明するためにこれまで実施した予備的試験を紹介するとともに、それを元に考察したい。

2. 土壌 pH 矯正が病原微生物の増殖・生存に与える影響

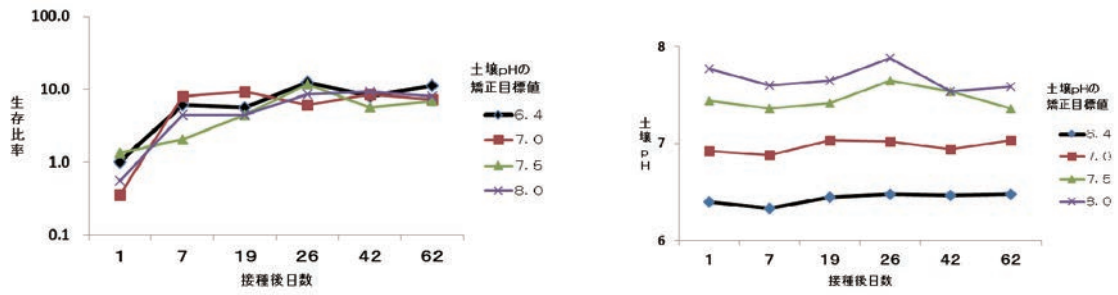
微生物には培地上で生育する場合の最適 pH 値があり、微生物の種類によってその値は異なる。そこで、土壌 pH を変化させてそこでの微生物種の増殖や生存様相を検討した。

園芸用育苗培土（タキイ種苗社製、土壌 pH6.4）を供試し、転炉スラグ、消石灰あるいは水酸化ナトリウム溶液を用いて段階的に土壌 pH を矯正し（矯正目標値 7.0、7.5、8.0）、オートクレーブして滅菌した。これらの土壌に植物病原糸状菌（*Fusarium oxysporum*、*Verticillium dahliae*）、植物病原細菌（*Clavibacter michiganensis* subsp. *michiganensis*、*Ralstonia solanacearum*）を接種して約 25°C で静置し、定期的に糸状菌や細菌を分離して土壌中の密度を測定するとともに、その時点での土壌 pH も測定した。

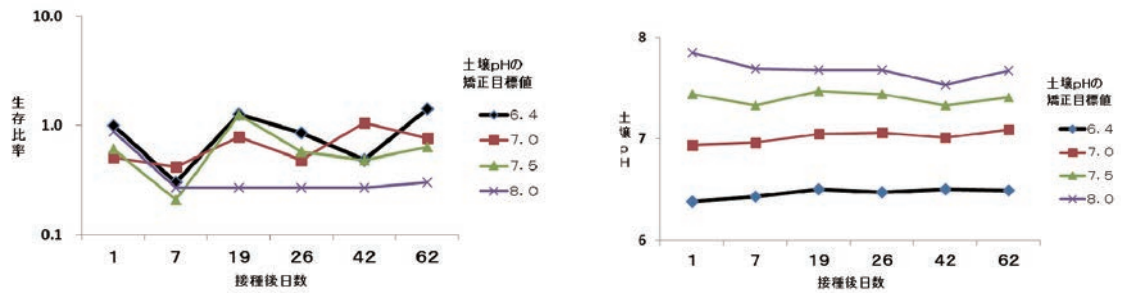
その結果、転炉スラグを用いた場合、供試したいずれの微生物種とも試験期間内での増殖および生存に顕著な変化は認められなかった。また、その際の土壌 pH は 6.4～7.8 の間で試験開始時の pH が維持されていた（図 1）。さらに、土壌 pH 矯正に用いた資材を転炉スラグから消石灰あるいは水酸化ナトリウム溶液に変更した場合でもほぼ同様の結果となった（データ省略）。

以上のことから、土壌 pH を 7.5 前後に矯正する程度では、本試験に供試した植物病原糸状菌 2 種および細菌 2 種に関して増殖や生存に影響することはないと考えられた。

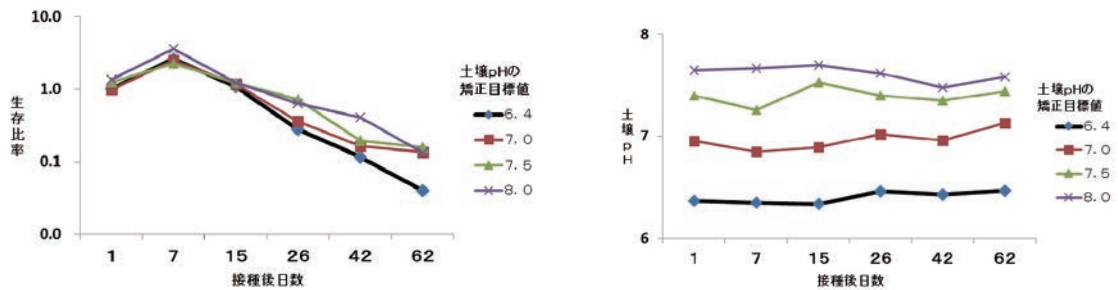
Fusarium oxysporum



Verticillium dahliae



Clavibacter michiganensis subsp. *michiganensis*



Ralstonia solanacearum

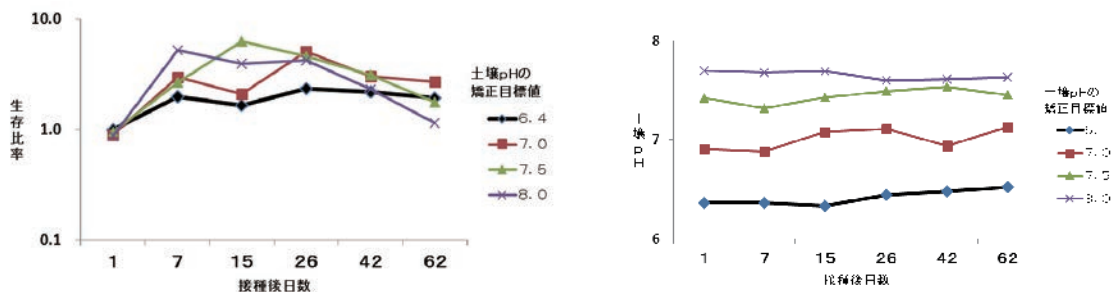


図1 転炉スラグで土壌pHを矯正した場合の病原微生物の生存比率(左)と土壌pHの推移(右)

生存比率は、各病原体を土壌に接種した翌日の土壌pH6.4区の菌数を1としたときの各試験区での生存数の比率で示した。

3. 転炉スラグによる土壌 pH 矯正が各種病害の発生に与える影響

次に、転炉スラグで土壌 pH を矯正した場合の各種病原菌が引き起こす病害の発病程度を未矯正の場合と比較した。

1) *Fusarium oxysporum* による土壌病害

Fusarium oxysporum による土壌病害については、ハウレンソウ萎凋病、レタス根腐病、イチゴ萎黄病、セルリー萎黄病について、土壌 pH が未矯正の場合よりも pH7.5 程度に矯正した場合において被害が軽減されることが圃場試験によって実証されている³⁴⁾。また、ハウレンソウ萎凋病については、pH5.8 の土壌を転炉スラグで矯正して pH7.2、7.8 および 8.2 とした場合の発病に及ぼす影響についてガラス室内で調査し、土壌 pH が高くなるにつれて発病程度が低くなることを明らかにしている³⁾。

2) *Verticillium dahliae* によるナス半身萎凋病

永坂³⁾は、プランターを用いたナス半身萎凋病に対する試験において、未矯正区よりも転炉スラグで pH7.5 程度に矯正した区で発病が激しくなる傾向があることを明らかにした。また、圃場試験においてもほぼ同様の結果が得られており、pH 矯正した圃場で作付けを繰り返した場合に被害が拡大することを観察している。この結果は、前述した *Fusarium oxysporum* による土壌病害とは逆の結果である。

3) *Clavibacter michiganensis* subsp. *michiganensis* によるトマトかいよう病

園芸育苗培土（タキイ種苗社製、土壌 pH6.4）を供試し、転炉スラグを用いて段階的に土壌 pH を矯正（矯正目標値 7.0、7.5、8.0）した。これらの土壌約 1kg にトマトかいよう病菌の懸濁液（約 10^8 cfu/ml）約 300 ml を土壌灌注して良く混和した。これを 15 cm ポットに入れてトマト種子（品種：桃太郎）を 1 ポット当たり 5 粒播種した。これらをガラス室で育苗し、20 日後に発病を調査した。

その結果、病原細菌を接種していない場合、土壌 pH を 8.0 まで矯正してもトマト苗の生育に変化はなかった（図 2 上）。一方、トマトかいよう病菌を接種すると、土壌 pH が高くなるにつれて生育が顕著に抑制された（図 2 下）。したがって、トマトの育苗時にかいよう病菌が存在する場合、転炉スラグによる土壌 pH 矯正により発病が促進されると考えられる。

つぎに、2012 年に場内圃場の一部に転炉スラグを施用して土壌 pH を矯正した。これにより、未矯正区の土壌 pH5.9、矯正区の土壌 pH7.0 の試験区を設けた。ここに健全トマト苗（品種：桃太郎、播種日 4 月 19 日、定植日 5 月 28 日）を定植し、翌日に全ての株元にトマトかいよう病菌の懸濁液（ 10^8 cfu/ml）20 ml/株を土壌灌注して接種した。その後、定期的に発病調査したところ、両区とも同様の発病経過を示し、土壌 pH 矯正が発病に与える影響は認められなかった（図 3 左）。

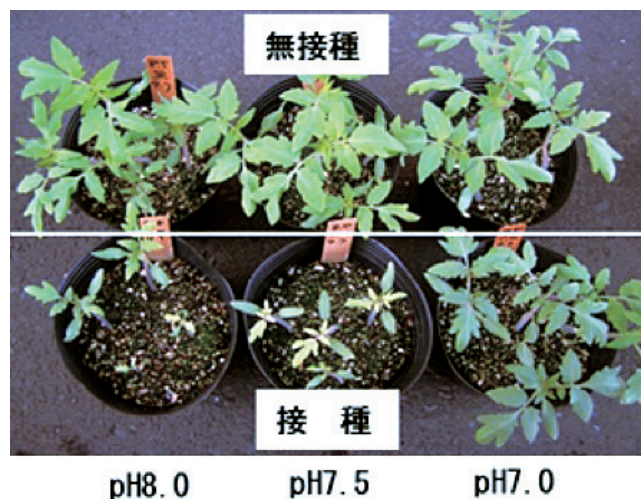


図 2 育苗期感染によるトマトかいよう病の被害発生状況



図3 試験圃場におけるトマトかいよう病の発病状況

2012年（写真左）は病原細菌を土壌灌注接種したため圃場全体が発病した。一方、2013年（写真右）は同一場所で通常の栽培を行ったが、外観上発病はなかった。

翌年の2013年は病原細菌を接種しない以外は同様の試験を行った。なお、矯正区には転炉スラグを追加して土壌 pH7.5 とした。その結果、健全トマト苗（品種：桃太郎、播種日 4月17日、定植日 5月28日）を定植して発病経過を観察したが、外観上かいよう病の症状は全く発生しなかった（図3右）。ただし、9月5日に主茎の地上部5～10 cm 部位を切断して維管束部位の褐変の有無を調査したところ、未矯正区 18.3%、矯正区 17.0%が褐変していた。本褐変が全てかいよう病の症状とは限らないが、褐変症状の出現に関して土壌 pH 矯正の影響は認められなかった。

以上のことから、トマトかいよう病は播種～育苗期では土壌 pH 矯正により発病が助長されると考えられる。一方、トマトかいよう病が発生した圃場に健全苗を移植する場合、土壌 pH 矯正の影響はほとんどないと考えられた。

4) *Ralstonia solanacearum* によるトマト青枯病

2013年に場内圃場において土壌 pH 無矯正区 (pH6.0) および矯正区 (矯正目標 pH7.5) を設け、トマト苗 (品種：「桃太郎」、4月17日播種) を6月4日に定植した。その翌日にトマト青枯病菌の懸濁液 (約 10^8 cfu/ml) を株元に約 10 ml ずつ灌注して接種した。なお、接種は1株おきに行い、無接種株の両側を発病させることで土壌伝染による感染として発病経過を観察した。



図4 試験圃場におけるトマト青枯病の発病状況 (2014年)

写真左は土壌 pH 未矯正、写真右は 2013年に土壌 pH 矯正した。

その結果、接種 48 日後に未矯正区で発病する株が認められ、その後発病が進展した。一方、土壌 pH 矯正区は未矯正区と比較して発病が抑制された (図4)。

以上のことから、転炉スラグによる土壌 pH 矯正は、トマト青枯病の被害を軽減すると考えられる⁵⁾。これについては、消石灰などの

石灰質肥料の施用で被害が軽減されることが既に報告されている⁹⁾ので、転炉スラグでも同様の効果が発揮されたものと推測される。

4. 発病抑制機構の解明に向けて

以上のように、転炉スラグで土壌 pH を 7.5 程度に矯正しても、病原糸状菌や病原細菌の増殖および生存に大きな影響を与えることはなかった。ところが、フザリウム病は土壌 pH を矯正した区の方が未矯正区に比べて発病が抑制されたのに対して、*Verticillium dahliae* によるナス半身萎凋病は発病が促進される場合も観察された。また、トマトかいよう病は育苗期において pH 矯正すると発病が促進される一方で、トマト青枯病は顕著な被害軽減効果が認められた。ここで、フザリウム病やトマト青枯病において土壌 pH 矯正により外観上発病がない個体でも、病原体の感染が認められる。このことは、発病抑制機構は病原体の感染を抑制しているのではなく、症状あるいは被害の発現を遅延させているのではないかと考えられる。しかし、ナス半身萎凋病や育苗期に発生するトマトかいよう病の発病が土壌 pH 矯正によりなぜ促進されるかについては現時点では予想がつかない。

土壌 pH 矯正による被害軽減あるいは促進効果がどのような作用機構で発現しているかについて理解することは、本技術のさらなる効果的な利用方法を明らかにするのに必要であり、そのことが今後の技術普及に大きく貢献すると考えている。

5. 引用文献

1. 荒木隆男 (1984)、生態的防除、新版土壌病害の手引、日本植物防疫協会、pp.189-199
2. 木谷清美・井上好之利・夏目孝男・池上雍春 (1957)、トマト萎凋病に関する研究 第2報 発病に及ぼす石灰の影響、四国農業試験場報告 3:163-171.
3. 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—研究成果集— (2015)、農研機構東北農業研究センター
4. 岩間俊太・倉内賢一・門田育生 (2014)、転炉スラグを用いた土壌 pH 矯正と品種耐病性の併用によるレタス根腐病の被害軽減効果、北日本病害虫研報 65:85-92.
5. 門田育生・今崎伊織 (2015)、転炉スラグを原料とした石灰肥料の土壌施用によるトマト青枯病の発病抑制、日植病報 81:59-60 (講要) .
6. 山崎弘道 (2004)、カルシウム吸収によるトマト青枯病抵抗性の向上に関する研究、野菜茶業研究所報告 3 : 1-56

土壌微生物の動態から見た転炉スラグの特性

森本 晶

農研機構北海道農業研究センター

1. はじめに

製鋼スラグの一つである転炉スラグは、土壌の酸性改良や微量元素補給を目的とする土づくり肥料として広く用いられている。こうした従来の一般的な用途の場合、転炉スラグ資材の施用量は10aあたり100~200kg程度である。一方、現在普及が進められている転炉スラグ資材を利用した土壌病害の被害軽減技術においては、土壌pHを7.5程度まで高める必要上、その施用量がしばしば10aあたり数トンにもなる。このような多量施用が土壌環境に及ぼす影響については未知の部分も多く、転炉スラグ資材を安心して農業現場で活用していくためには、この資材の作用特性を様々な観点から理解しておくことが重要である。ここでは、栽培環境を構成する重要な要素の一つである土壌微生物に焦点をあて、転炉スラグ資材が土壌中の細菌・糸状菌に及ぼす影響について演者らの解析事例を紹介する。

2. 室内模擬実験における転炉スラグ資材の微生物影響評価

まず、様々な条件をコントロールしやすい実験室環境下で以下のような模擬実験を行った。農家ハウスから採取した土壌を500mL容量のポリビンに充填し、転炉スラグ資材(てんろ石灰)をpH7.5になるように混和した。この添加量は10aあたり(作土10cm)に換算すると約1.5tに相当する。対照として無処理および土壌消毒(ダゾメット)処理を設け、各3反復のポリビンを25°Cで静置培養した。処理に伴う土壌微生物の動態を調べるために、各ポリビンから培養開始時、15日後、30日後に土壌を採取し、希釈平板法による生菌数の測定とPCR-DGGE法による細菌・糸状菌群集の解析¹⁾を行った。

各処理土壌の細菌、糸状菌密度を図1に示す。ダゾメット処理ではいずれのコロニー数も減少し、特に糸状菌密度の顕著な低下がみられたのに対し、転炉スラグを添加した土壌の細菌・糸状菌密度には無処理との差が認められず期間を通じてほぼ一定だった。

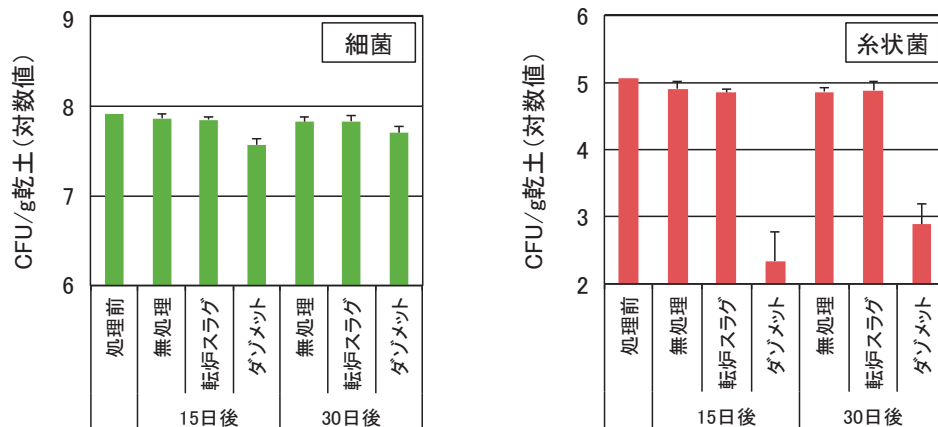


図1 各処理土壌中の細菌・糸状菌密度の変化

細菌は1/10 Tryptic Soy Agar、糸状菌はローズベンガル寒天培地により計数

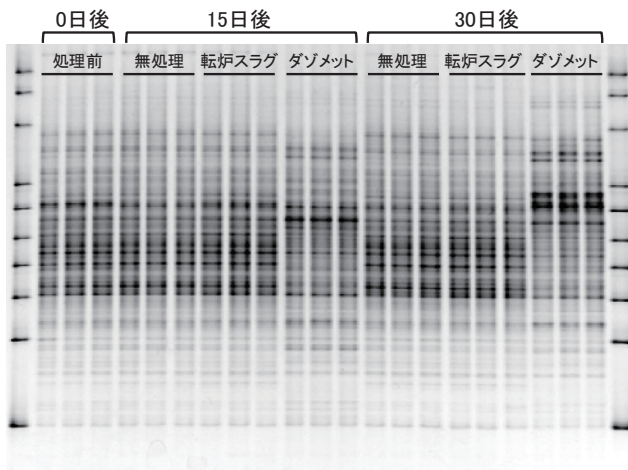


図2 各処理土壌の DGGE パターン (細菌)

土壌 DNA から PCR 増幅した細菌 16S rDNA 産物を変性剤濃度勾配ゲル電気泳動で分離したもの。群集構造の違いがバンドパターンの差として表される。

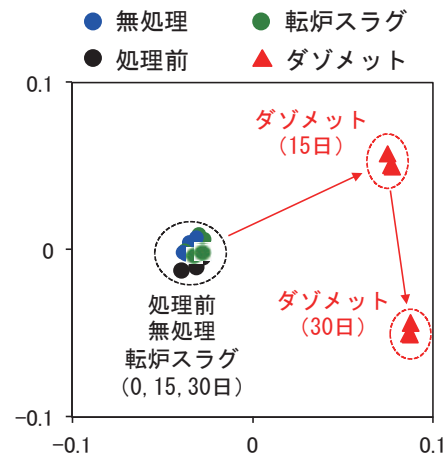


図3 DGGE パターンの主座標分析

図2のバンドパターンを数値化し各群集の関係を2次元上に表したもの。群集構造が似たものは近傍にプロットされる。

各土壌の細菌群集を PCR-DGGE 法で解析した結果を図2, 3に示す。ダゾメットで処理した土壌ではバンドパターンが大きく変動しており、処理に伴って細菌群集構造が明らかに変化していることが分かるが、転炉スラグ添加土壌のパターンには無処理区との違いがなく、群集構造の変化は認められなかった。糸状菌群集についても同様の解析を行ったが、結果は同様であった(データ略)。これらの結果は、転炉スラグ資材にはダゾメットのように土壌中の細菌、糸状菌を死滅させるような作用はなく、それらの群集構造にもほとんど影響を及ぼさないことを示している。

3. 圃場における転炉スラグ資材の微生物影響評価

上記の結果はあくまで実験室条件下の短期的な微生物影響を評価したものであり、実際の圃場での現象を反映したものとは言い切れない。そこで、東日本各地(青森、岩手、宮城、福島、静岡)で実施された転炉スラグ資材の実証試験圃場から、土壌サンプルを経時的に収集し、土壌微生物群集のモニタリングを行った。以下、その一例として福島県のイチゴ農家圃場における結果を示す。この圃場では土壌 pH 矯正によるイチゴ萎黄病の被害軽減効果の実証試験が実施され、転炉スラグの材型の違いも考慮して、粉状(てんろ石灰)、粒状(ミネカル)それぞれの転炉スラグ資材で pH7.5 に矯正した区と、無処理区、クロルピクリン区が設けられた。これらの4処理区から転炉スラグ施用時(0日時)、イチゴ苗定植時(21日後)、イチゴ栽培中(203日後)、試験終了時(231日後)に土壌を採取し、PCR-DGGE による細菌・糸状菌群集の解析を行った。

図4は各処理区土壌の細菌、糸状菌群集の PCR-DGGE パターンについて主座標分析を行った結果である。この試験ではいずれの区においても経時的に細菌・糸状菌群集構造の遷移が観察されたが、その挙動は無処理区、粒状転炉スラグ区、粉状転炉スラグ区ではほぼ一致していた。この経時的な群集構造の遷移はイチゴの生育等にもなう土壌環境の変化を反映したものと推察されるが、無処理区と両転炉スラグ区の遷移パターンには明らかな違いがないことから、材型によらず転炉スラグ資材が土壌細菌、糸状菌群集の構造に及ぼす影響はほとんどないと考えられた。一方、クロルピクリン区では栽培期間を通じて細菌・糸状菌群集構造が他の区とは明

らかに異なる挙動を示しており、上述の室内模擬実験の結果と同様に土壤微生物が大きな影響を受けていることが分かる。

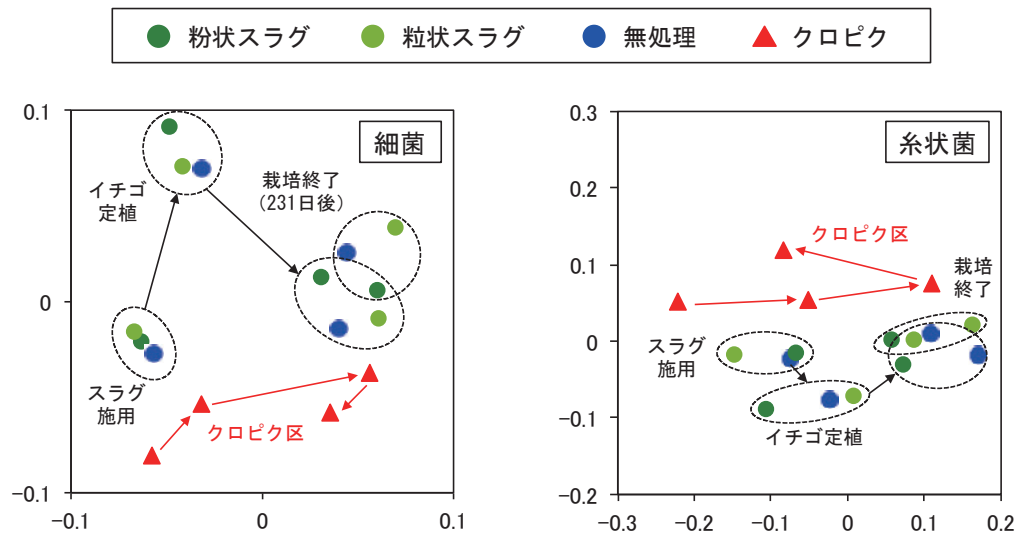


図4 農家圃場での転炉スラグ資材実証試験における土壤微生物影響評価の例
 土壤中の細菌 (左) および糸状菌 (右) のPCR-DGGE パターンに基づく主座標分析。

4. まとめ

演者らは、上述の結果の他に各地で実施された10例以上の圃場試験を対象として土壤細菌、糸状菌に対する転炉スラグ資材の影響評価を行ってきたが、転炉スラグ資材の施用によって短期間で土壤中の細菌、糸状菌の密度が低下したり群集構造が大きく攪乱されたりした事例は確認されていない。以上の結果をふまえると、転炉スラグ資材が土壤微生物群集に与える影響は非常に小さく、その施用によって農地土壤の生物性に問題が生じる可能性は低いと考えられる。また、転炉スラグ資材の施用は *Fusarium* 等の土壤病原菌密度にも影響しないことが報告されており²⁾、その性質は殺菌的な作用をもつ土壤消毒剤とは明らかに異なる。にもかかわらず、転炉スラグ資材による土壤 pH 矯正が土壤病害の被害軽減に有効である点は大変興味深い。この発病軽減には病原菌密度や土壤生物性では説明できないいくつかの要因が関わっていると思われる、作用メカニズムの解明が待たれている。

転炉スラグ資材によっても土壤微生物群集はほとんど影響を受けないと上述したが、例外として施用後数年を経過した一部の圃場で無処理区とやや異なるバンドターンが観察されるケースがあった。これは転炉スラグによる直接的な影響というよりも、長期間高 pH が維持されたことによって群集構造が高 pH 環境に適した構成に徐々に変化したためと考えられる。こうした長期的な微生物相の変化がもたらす影響については引き続き注目していく必要があるだろう。

5. 引用文献

1. 森本品・星野 (高田) 裕子 (2008)、PCR-DGGE 法による土壤生物群集解析法 (1) 一般細菌・糸状菌相の解析、土と微生物 62(1) : 63-68
2. 岩間俊太・倉内賢一・門田育生 (2014)、転炉スラグを用いた土壤 pH 矯正と品種耐病性の併用によるレタス根腐病の被害軽減効果、北日本病害虫研報、65 : 85-92

新たな防除技術開発に向けて

今崎 伊織

農研機構東北農業研究センター

1. はじめに

作物の安定生産を確保するためには、伝染病の防除が不可欠である。伝染病の主因である病原菌は、その生息場所や伝染方法の違いから、空気伝染病菌と土壌伝染病菌に分けることができる。空気伝染病の防除は、茎葉への農薬散布や抵抗性品種の利用によって防除が可能である。一方、土壌伝染病は病原菌が土壌中に生息するため、茎葉への農薬散布では防除効果を得ることが難しく、作物の栽培土壌の消毒と抵抗性品種の利用を主とした対策が講じられている。

土壌消毒は、燻蒸剤や熱水などの処理によって殺菌する方法、水や有機物処理によって還元化を引き起こして殺菌する方法などによって実施されている。しかし、土壌中の病原菌をこれらの方法で完全に殺菌することは難しく、病原菌の再増殖を防ぐために、定期的に消毒する必要がある。また、消毒時には土壌表面をシートで被覆するため労力がかかる。さらに、消毒効果を発揮させるためには作期中に実施する必要があるため経営面にも負担がかかる。一方、抵抗性品種は、すべての伝染病に対して育成されているわけではない。さらに、病原菌の変異によって抵抗性が打破されうることも知られている。最近、農林水産業・食品産業科学技術研究推進事業にて実施された「転炉スラグによる土壌 pH 矯正を核としたフザリウム性土壌病害の耕種的防除技術の開発（課題番号 24015）」では、製鉄所の副産物である転炉スラグを用いて栽培土壌を弱アルカリ（pH7.5 程度）化させることによって、土壌生息性の糸状菌の一種である *Fusarium oxysporum* によって引き起こされる伝染病の被害を軽減できることが示された。このような栽培土壌の管理は、土壌消毒、抵抗性品種の利用と組み合わせて実施することが可能であり、防除プログラムの一手段として有効であることが予想される^{1),2)}。

作物の栽培土壌は、一般的に弱酸性（pH6.0～6.5 程度）が適しているとされているが、我が国では降雨量が多いことから、農耕地の土壌 pH は自然に低下する傾向にある。土壌 pH がこの範囲より低下した土壌に対しては、消石灰や苦土石灰などのアルカリ性肥料の施用によって、pH を矯正することが望ましいとされている。しかし、消石灰や苦土石灰の pH 矯正効果が発揮される期間はあまり長くないため毎作のように施用する必要があること、また、その期間を長くするために多量に施用すると微量元素欠乏が引き起こされ作物の生長に悪影響が生じることが問題である。一方、転炉スラグの特徴は、粒子サイズや化学的組成から複数年間にわたって pH 矯正効果を発揮する点、弱アルカリ性（pH7.5 程度）にまで土壌 pH を矯正しても、微量元素が豊富に含まれていることから、作物の生長に悪影響を及ぼさない点が優れている³⁾。しかし、栽培土壌全体の pH を弱アルカリ性まで矯正するためには多量の施用が必要であることからコストや労力がかかる。また、弱アルカリ性土壌で発生が助長される伝染病があることも知られており、pH 矯正効果の持続期間が長い場合、問題が生じた際の復元が困難になる欠点がある。

以上のような背景のもと、演者らは転炉スラグが栽培土壌の弱アルカリ化によって *F. oxysporum* による土壌伝染病の発生を軽減できる点に着目し、土壌消毒や抵抗性品種と併用可能で、さらに、省力、省コスト、環境調和的な技術の開発を目指した(図1)。その実現に向けて、転炉スラグによって土壌を弱アルカリ性に矯正する耕種的技術に加え、土壌伝染病の発生を軽減することが可能な微生物(有用微生物)を利用する生物的技術、作物が本来持ち合わせている防御応答を活性化させる物質(抵抗性誘導物質)を利用する化学的技術を育苗中に組み合わせて施すことによって、それらの相乗的な発病軽減効果を引き出すことを試みている。

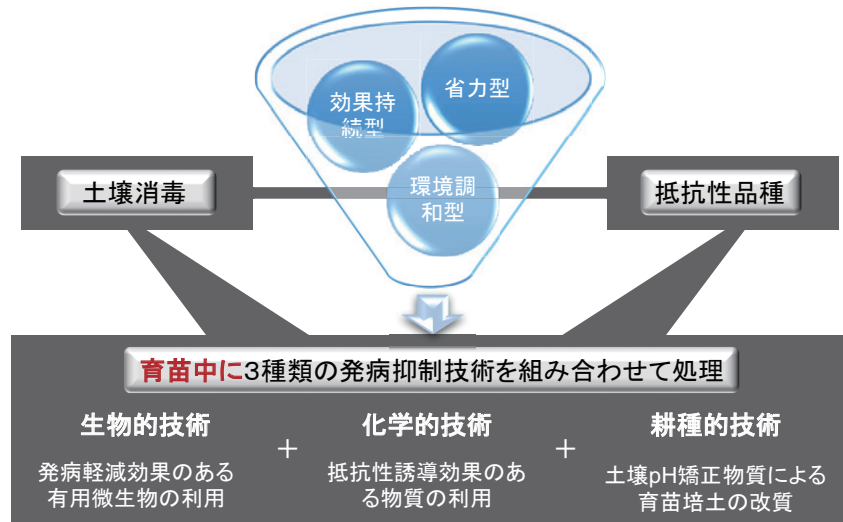


図1 土壌伝染病の新たな防除技術開発の方向性

2. 耕種的技術(育苗培土pH矯正)と組み合わせる生物的技術(有用微生物)および化学的技術(抵抗性誘導物質)について

有用微生物を作物苗の根にあらかじめ接種しておくこと、土壌伝染病菌が存在する土に定植した際に発病程度が軽減される現象が多く報告されている。発病を軽減するメカニズムは、有用微生物があらかじめ根に定着していることで病原菌の感染の場を奪うこと、栄養摂取において両者が競合すること、作物が本来持ち合わせている防御応答が活性化されることあるいは活性化されやすい状態になること、有用微生物が分泌する抗生物質によって病原菌の生長が抑制されること、有用微生物の種類によっては分泌物によって病原菌を溶解しエサにすることなどが知られており、これらが複合的に作用して効果が発揮されると考えられている。

F. oxysporum のサツマイモ病原性菌群によって引き起こされるサツマイモつる割病に対して、有用微生物(非病原性 *F. oxysporum* の一系統)をあらかじめ接種することで発病程度を軽減できることが小川・駒田(1984)⁴⁾によって見いだされた。その後、本現象を利用した生物農薬が市販されるに至ったものの、現在は販売が中止されている。生物農薬は環境調和型の農業を実践する上で有効な手段のひとつとして認識されているものの、化学農薬に比べて効果が劣ったり不安定であったりすることから、慣行的な栽培では主要な手段には至っていない。したがって、これまでに蓄積された多数の研究成果を農業現場に還元することは作物保護研究者の急務である。そこで演者らは、有用微生物の単独の作用を期待するのではなく、化学的技術および耕種的技術と組み合わせることによって、その作用を補助的に活用することが重要と考え、生物的技術として有用微生物を今回開発する技術の一要素とした。

化学的技術として使用する抵抗性誘導物質とは、殺菌活性をもたないにもかかわらず発病を防

ぐことができる物質を指す。抵抗性誘導物質を処理した作物では、防御応答が活性化され病原菌による感染が全身的に阻害される。我が国では、抵抗性誘導物質を農薬として世界に先駆けて利用してきた⁵⁾。現在、イソチアニル、チアジニル、バリダマイシン A、プロベナゾールが農薬として実用化されており、農業生産の安定化に寄与している。

殺菌活性をもつ農薬を使用し続けると、その農薬に対して非感受性の病原菌系統(薬剤耐性菌)の発生リスクを伴うが、抵抗性誘導物質の場合ではそのようなリスクが極めて低いことが大きなメリットである。その反面、処理の量やタイミングによって生長阻害などの副作用を生じうる欠点も持ち合わせている。多数の抵抗性誘導物質が見いだされてきたにもかかわらず、その大部分は農薬として実用化に至らない原因のひとつは、この副作用を克服できないことである。実用性のある新たな抵抗性誘導物質を見いだすことが容易ではない現状から、既存の抵抗性誘導物質がもつ能力を最大限活用することが重要と考え、生物的技術および耕種的技術による作用と組み合わせ、相乗的な発病軽減効果を引き出すことを図った。

3. メロンつる割病を対象とした研究状況

メロンつる割病は、*F. oxysporum* のメロン病原性菌群 (メロンつる割病菌) によって引き起こされる。本病原菌が蔓延すると、その病原性の強さから甚大な被害を受ける。本病に対しては、これまでに多数の抵抗性品種が育成されてきた。その理由は、品種がもつ抵抗性を打破するメロンつる割病菌の系統の出現が繰り返され、そのたびに新たな抵抗性品種が育成されてきたためである。最後に出現した系統に対しては十分な抵抗性を発揮できる品種の育成が遅れており、そのため土壌消毒が重要な防除手段となっている。しかし、土壌消毒は前述のように労力がかかり経営面の負担にもなる。新たな防除技術を開発し、土壌消毒の実施頻度を減らすことができれば、生産現場の負担軽減につながる。以上の理由から、本研究ではメロンつる割病を新技術の開発対象として選定した。

はじめに、生物的技術として利用する有用微生物の選抜を実施した。トマト茎内と土壌から *Fusarium* 属菌 723 菌株を分離し⁶⁾、それらの一部を本選抜に供試した。寒天培地上で培養した各供試菌株の集落 (コロニー) 表面に滅菌水を注ぎ、表面を綿棒でこすって菌糸や孢子などの菌体を遊離させた。各供試菌株の菌体懸濁液を播種直後のメロンの培土に接種し、子葉が展開するまで栽培した後、メロンつる割病菌の菌体懸濁液を培土に接種した。その後、メロンつる割病が発生するまで栽培し、各供試菌株を接種したメロンの発病の様子を比較した。その結果、発病軽減効果を示した供試菌株が認められたことから、それらを有用微生物の候補とした。二次的な選抜として、転炉スラグによって pH を 7.5 に矯正した培土を用いて、各候補菌株の発病軽減効果を検定した。各候補菌株をあらかじめ接種したメロン苗を準備し、メロンつる割病菌を接種した培土 (pH7.5) に移植した。メロンつる割病が発生するまで栽培し、土壌 pH7.5 の条件下で発病軽減効果を示す有用微生物 SL0037 株を選抜した。

次に、化学的技術として利用する抵抗性誘導物質として、農薬として長年の実績をもつプロベナゾールを選定し、生物的技術および耕種的技術と組み合わせて施す場合の効果について調べた。有用微生物 SL0037 株とプロベナゾールをあらかじめ施したメロン苗を準備し、メロンつる割病菌を接種した土（転炉スラグを用いて pH7.5 に矯正）に移植した。十分に発病するまで栽培したところ、SL0037 株、プロベナゾール、転炉スラグを組合せて施したメロン植物で発生程度が最も軽減された（図2）。

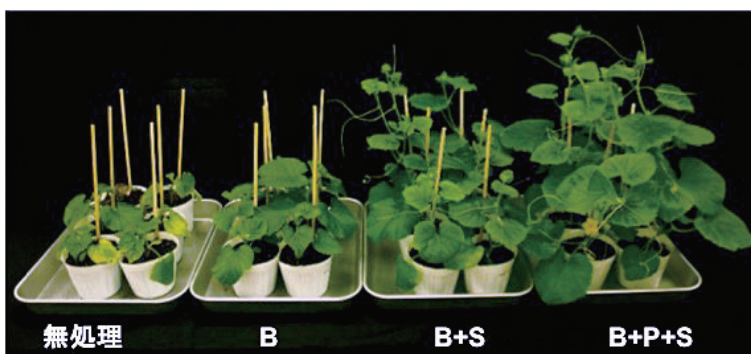


図2 メロンつる割病の発生に与える生物的技術 (B)、化学的技術 (P)、耕種的技術 (S) の効果

生物的技術として有用微生物、化学的技術として抵抗性誘導物質を施したメロン苗を病原菌汚染土（耕種的技術として転炉スラグを施し、pH7.5 に矯正）に植えて温室内で栽培した。

以上の予備的実験の結果は、生物的技術、化学的技術、耕種的技術を組み合わせて施すことによって、メロンつる割病の発生程度を軽減できることを示唆している。そこで、圃場におけるその効果について検証した。SL0037 株、プロベナゾール、転炉スラグを施した培土を用いてメロン苗を準備し、メロンつる割病菌を接種した圃場に定植した。栽培の結果、メロンつる割病の病名の由来となった「つる割症状」の他にも、生長障害、黄化、萎凋などの病徴が現れ、重症化した個体は枯死に至った。また、以上の病徴が単独あるいは複合的に現れるなど、病徴そのもので発病程度を評価することができなかった。そこで、メロン植物の主茎長を測定し、生長の程度に基づいて生物的技術、化学的技術、耕種的技術を組み合わせて施した効果を評価した。その結果、三技術を全て組み合わせた場合に主茎長の値が最も高くなった（図3）。3年間の圃場検証を終え、気象条件等の違いによって程度は異なったものの、三技術を組み合わせることによる発病軽減効果がいずれの年にも確認できた。



図3 メロンつる割病の発生に与える生物的技術 (B)、化学的技術 (P)、耕種的技術 (S) の効果

生物的技術として有用微生物、化学的技術として抵抗性誘導物質、耕種的技術として転炉スラグを施したメロン苗を病原菌汚染圃場に植えて栽培した。

4. おわりに

本技術を実用化させるためには、演者らが分離した有用微生物 SL0037 株と既存の抵抗性誘導物質（プロベナゾール）をメロンつる割病に対する農薬として登録することが不可欠である。また、生産現場へのスムーズな普及を図るためには、本技術が導入された苗生産体系を確立するこ

とが強く望まれる。現在はメロンつる割病を対象に技術の開発を進めているが、他の伝染病に対しても効果を発揮できる汎用的な技術に発展させ、その価値を高めることは次の研究課題である。また、長期間に渡って栽培する作物では、育苗中の処理のみでは効果を持続させることは困難と思われる。したがって、本技術の施用のタイミングを育苗期間のみから圃場での栽培期間にまで拡張した場合、すなわち、圃場の栽培土壌 pH を弱アルカリ性まで矯正すること、抵抗性誘導物質を圃場での栽培期間に施すことなどを併せて研究していくことも有意義と考えている。また、弱アルカリ土壌で発生が助長される伝染病が知られており、有用微生物や抵抗性誘導物質によってこれらの発生程度をどの程度軽減できるのかについても検証する必要がある。これまでに、有用微生物を使った土壌伝染病の発生程度の軽減については、研究レベルでは多数報告されている。しかし、実用化に至った例はわずかに過ぎない。その理由のひとつは、前述のように化学農薬と比較して効果が劣ることである。今回の技術では、有用微生物を抵抗性誘導物質、転炉スラグと組み合わせて施し、それらの相乗的な効果を引き出した。有用微生物を有効活用していくための方法論のひとつとして本技術を提案したい。

最後に、本技術開発にあたって、有益なご助言とご支援をいただいた門田育生博士、御子柴義郎博士、兼松誠司博士、技術的なご協力をいただいた早坂和広氏、小館洋一氏、後藤正幸氏、知的財産に関する手続きや広報、各種の管理業務を担当していただいた企画管理部の各位に心よりお礼申し上げます。

5. 引用文献

1. 岩間俊太・倉内賢一・門田育生 (2014)、転炉スラグを用いた土壌 pH 矯正と品種耐病性の併用によるレタス根腐病の被害軽減効果、北日本病害虫研報 65:85-92
2. 大島宏行・後藤逸男 (2015)、太陽熱消毒と併用したセルリー萎黄病の被害軽減技術と微量元素の挙動、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—研究成果集(詳細版)— p. 33-38
3. 後藤逸男・村上圭一 (2006)、ひと味がう酸性改良、根こぶ病 おもしろ生態とかしこい防ぎ方 —土壌病害から見直す土作り—、農文協 p. 77-84
4. 小川奎・駒田旦 (1984)、非病原性 *Fusarium oxysporum* によるサツマイモつる割病の生物的防除、日植病報 50:1-9
5. Watanabe, T., Igarashi, H., Matsumoto, K., Seki, S., Mass, S., Sekizawa, Y. (1977), The Characteristics of Probenazole (Oryzmate) for the Control of Rice Blasts. J. Pesticide Sci. 2:291-296
6. Imazaki, I., Kadota, I. (2015), Molecular Phylogeny and Diversity of *Fusarium* Endophytes Isolated from Tomato Stems. FEMS Microbiol. Ecol. 91 (In Press)

作物のカドミウム吸収抑制への利用

大島 宏行

東京農業大学生物応用化学科

1. はじめに

本研究室では、これまでに転炉スラグを施用して pH(H₂O)を7程度まで高めても、植物にホウ素、マンガン、鉄などの微量元素欠乏をきたしにくいことを明らかにしてきた¹⁾。転炉スラグには、肥料取締法(副産石灰肥料・鉍さいケイ酸質肥料)による有害成分としてニッケル、クロム、チタン含有最大量が設けられているが²⁾、これら成分の土壌から植物への移行は明らかにされておらず、普及を妨げる一要因となっている。そこで、ポット試験により野菜の生育に支障をきたさない転炉スラグの最大施用量および、pH(H₂O)の違いによるホウ素、マンガン、クロム、チタン、ニッケルの移行に及ぼす影響について明らかにした。

また、農作物の安全性への関心の高まりから、農作物中のカドミウム含有量の低減化を図る技術開発も求められている³⁾。植物による土壌からのカドミウム吸収を低減する方法として各種アルカリ資材を施用することにより植物のカドミウム吸収が抑制されることが報告されている⁴⁾。そこで、転炉スラグによる土壌酸性改良に伴い、土壌中のカドミウムなど有害金属の野菜への移行を軽減できる可能性についても追求したので紹介する。

2. 転炉スラグの多量施用が植物の微量元素吸収に及ぼす影響

酸性が強く、微量元素含有量が低い未耕地黒ボク土に炭カル、苦土石灰、転炉スラグをそれぞれ施用して pH(H₂O)を 6.5 から 8.0 に改良した。さらに、土壌酸性改良資材の種類と土壌 pH の違いが土壌中でのカドミウムの挙動に及ぼす影響を調べる目的で、全試験区の土壌に硫酸カドミウムを Cd として 1 mg/kg 添加した。1/500 a コンテナでチンゲンサイ、ソルゴーを連続で栽培した。

その結果、苦土石灰区、炭カル区では酸性改良により収量が低下したのに対し、転炉スラグ区では pH(H₂O)を 8.0 まで改良しても無改良区と同等の収量であった (図 1)。植物中のマンガン含有量は、資材の種類にかかわらず pH(H₂O)の上昇により減少した。一方、苦土石灰区、炭カル区におけるホウ素含有量は、pH(H₂O) 7.0 以上の区では、チンゲンサイやソルゴーの欠乏と判断される値を下回ったが、転炉スラグ区では無改良区と同等の値を維持した。苦土石灰区、炭カル区における生育低下の要因はホウ素欠乏と考えられた (図 2)。

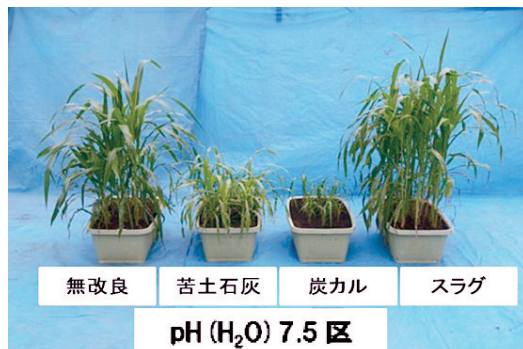


写真1 pH(H₂O) 7.5 区におけるソルゴーの生育状況

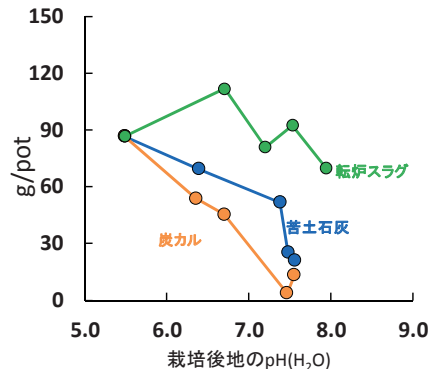


図1 酸性改良資材の違いがソルゴーの生育に及ぼす影響

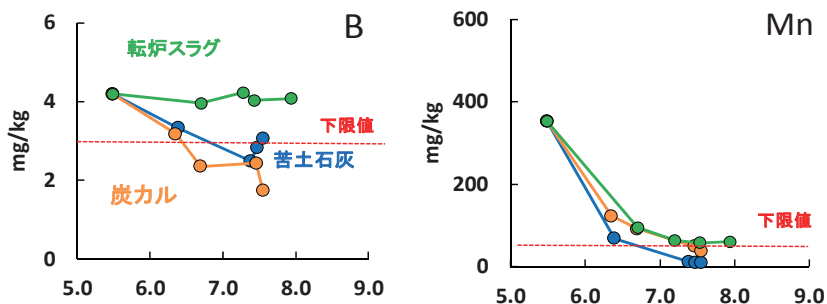


図2 ソルゴのホウ素、マンガン含有量

3. 転炉スラグの多量施用が植物の微量元素吸収に及ぼす影響

転炉スラグ区におけるチンゲンサイとソルゴのニッケル、チタン、クロム含有量は無改良区と比べて、同等かそれ以下で、他の酸性改良資材区と差も認められなかった。転炉スラグ中に含まれるニッケル、チタン、クロムは植物に移行しない。また、ソルゴのカドミウム含有量は転炉スラグ pH(H₂O) 8.0 区で最低値を示し、無改良区の 1/5 程度にまで低減された⁵⁾。

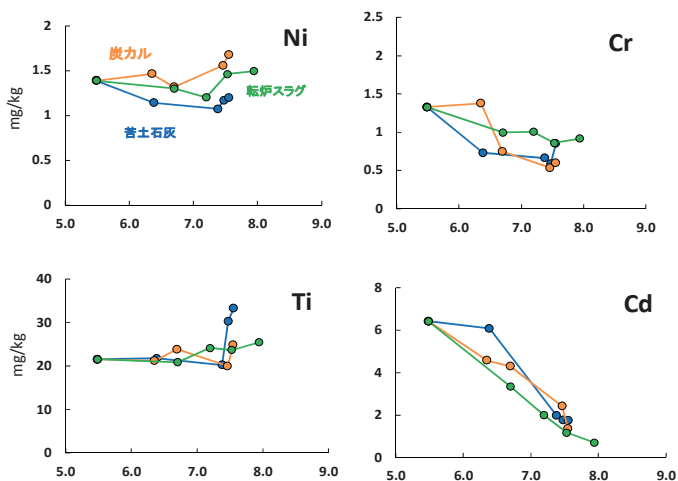


図3 酸性改良資材の違いがソルゴの微量元素含有量に及ぼす影響

4. 酸性改良可能な pH

次に、転炉スラグを施用して pH(H₂O)を 6.5 から 8.0 に改良した土壌を用いて 7 種類の植物を連続で栽培した結果を表 3 に示す。エンツアイ、ソルゴ、ホウレンソウ、ギニアグラス、トマトでは pH(H₂O)を 7.5 以上に高めると無改良区と比べて収量が低下することが確認された。

5. おわりに

転炉スラグを土壌に多量施用して pH(H₂O)を 7.5 程度にまで高めても、野菜や緑肥作物の生育に支障のないことが確認できた。また、転炉スラグ中に含まれるニッケル、チタン、クロムが植物に吸収移行することはない。したがって、転炉スラグを施用する際の酸性改良目標 pH(H₂O)は 7.5 に設定することが望ましい。また、転炉スラグを土壌酸性改良資材として施用し、pH(H₂O)を 7.5 程度まで高めても植物の生育に支障をきたすことなくカドミウム含有量を低下させることができたことから、カドミウム吸収抑制資材としても有効である。

表 1 収量が低下しない pH(H₂O)

pH(H ₂ O)	供試植物
8.0	チンゲンサイ エダマメ
7.5	エンツアイ ソルゴ ホウレンソウ ギニアグラス トマト

6. 文 献

1. 後藤逸男・村上圭一 2006. ひと味ちがう酸性改良、根こぶ病 おもしろ生態とかしこい防ぎ方・土壌病害から見直す土づくり-. p77-84、農文協,. 東京
2. (独)農林水産消費安全技術センター：石灰質肥料、肥料取締法に基づき普通肥料の公定規格を定める等の件、<http://www.famic.go.jp/ffis/fert/kokuji/60k0284.htm>
3. 農林水産省農林水産技術事務局 2005. 農用地土壌から農作物へのカドミウム吸収抑制技術等の開発に関する研究. 農林水産省農林水産技術会議事務局
4. 雄川洋子・稲原 誠 2009. アルカリ資材を用いた土壌 pH 矯正によるダイズのカドミウム吸収抑制. 土肥誌, 80, 589-595.
5. 大島宏行・後藤逸男 2014. 転炉スラグの多量施用が作物への微量元素収集に及ぼす影響. 土肥要旨集, 60, 136

藻場造成等海域利用に向けた取り組み

加藤 敏朗

新日鐵住金(株)先端技術研究所

1. はじめに

鉄鋼スラグの利用は、路盤材や簡易舗装材といった道路用材料、軟弱地盤の土壌改良材、あるいは本シンポジウムの主題である農業用の肥料・土壌改良材などのような陸域用途に限定されることなく、海域においても有用に活用できる資材として注目されている。

著者らは、鉄鋼スラグやそれを原料とした固化体などを構造材として利用することばかりでなく、鉄鋼スラグの特性を活かした機能材としての利用技術の開発を進めてきており、以下、本報告では代表的な海域利用技術について概要を述べ、特に藻場造成技術について事例を交えて詳しく紹介する。

2. 海域環境の改善技術へのスラグの活用

1) 人工石材（鉄鋼スラグ水和固化体）

鉄鋼スラグ水和固化体は、セメント原料として活用してきた高炉水砕スラグ微粉末を結合材とし、転炉系製鋼スラグを骨材としてオールリサイクル材からなるコンクリート代替品であり、型枠を用いた無筋コンクリートブロック代替の成形品や所望のサイズで塊上に破碎した人工石材等の自由な形状での製造が可能である（図1）。これらの人工石材は、裏込め石、傾斜護岸材、被服石など港湾土木工事資材のほか、漁礁や藻場礁など水産用基材（ビバリー®ロック・ブロック）として活用されている。



図1 鉄鋼スラグ水和固化体

2) ミネラル供給材（ビバリー®ユニット、人工ミネラルM型）

沿岸域の藻場が衰退する「磯焼け」現象については気象変化、生物相変化（ウニや魚などの食植生物による食害）、人工的な海域環境改変などによる潮流変化や海水水質変化などが複合的に影響しているといわれ、その解決に向け様々な取り組みが行われている^{1,2)}。

これらの磯焼けに対して、藻場を再生するための技術として、前述の人工石材を用いた藻礁とともに、貧栄養の海域における海藻類の生長促進を期待したミネラル供給材を提案している。ミネラル供給材としては、鉄分供給を主たる目的としてビバリー®ユニットと、鉄に加えてそれ以外のミネラル成分の供給も期待した人工ミネラルM型があり、各地で実証実験を実施している。このうち、前者の技術については北海道増毛町において2004年に開始した実証実験および2014年に開始した実証事業の経過を交えて3節で詳しく紹介する。

3) 浚渫土改質材（カルシア改質材）

鉄鋼スラグの潜在水硬性を利用し、港湾・航路の保全で発生する軟弱な浚渫土の強度改善材として活用が進められている。転炉系製鋼スラグを原料として成分管理と粒度調整を施したカルシア改質材を、軟弱な浚渫土に混入することで強度が改善し、その改質土を浅場・干潟の造成や浚渫窪地の埋戻しに活用する技術であり、実海域での実証試験を経て実用化が進められている。また、カルシア改質土は、浚渫土の物理的な性状を改質するばかりなく、浚渫土からのりんの溶出や硫化物の発生を抑制する効果があり、富栄養化した内湾や閉鎖性海域の底質環境を改善する技術として期待されている。

3. 鉄分供給ユニットを用いた藻場造成

近年、河川を介した森林から海域のつながりが重要視され、海域への栄養の供給が着目されている。海藻の生育には窒素やりんなどの栄養塩類のほか鉄分も必要とされ、鉄イオンは水中の溶存酸素で容易に酸化されて三価鉄となり不溶性の水酸化コロイドとして沈殿してしまう。これに対して森林土壌中では鉄イオンが腐植酸と錯体を形成して、溶存態鉄として安定的に海域へもたらされると考えられている。この原理に基づき、東京大学の定方正毅名誉教授らの発案によって、図2に示す

ように鉄イオンの供給源として炭酸化した転炉系製鋼スラグを用い、錯体形成にかかせない腐植酸の供給源として腐植土を用いた鉄分供給ユニット（ビバリ[®]ユニット）の開発³⁾に至り、海の緑化研究会（会長 東京大学山本光夫特任准教授）のサポートを得て実証検討を進めてきた⁴⁾。

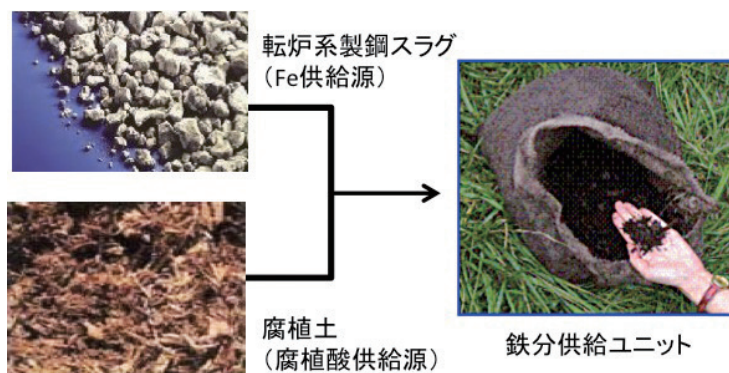


図2 鉄分供給ユニット

1) 北海道増毛町舎熊地区における実証実験（2004年～）⁵⁾

2004年10月、北海道増毛町舎熊海岸において鉄分供給ユニットを埋設し（図3a）、その後、10年にわたってその海域の藻場の状況や海水水質について継続的に観測を実施してきた。9年目の2013年6月においても、実験区の海岸にはホソメコンブを中心とした海藻群落が維持されている様子が観察されている（図3b）。

本海岸は、50m沖合でも水深1.5m程度の遠浅であり、粒度20～50cmの玉石からなる地盤であり、さらに干満差が小さいことから供給した養分が希釈拡散されずにとどまることが期待された。実験区の汀線を26mにわたって掘削し、ヤシ繊維袋に充てんした鉄分供給ユニットをのべ約6t埋設した。実験区から西に108m離れた地点に対照区を設置して、海藻が繁茂する時期（6～7月）に定期調査を実施した。

藻場調査は、汀線部から沖合50mまでの植生調査（ベルトトランセクト法）、また、沖合50mまでの各観測点（3、5、10、25、50m）において50cm方形枠内の海藻重量調査（コドラー



図3 鉄分供給ユニットの施工事例（工事風景と9年目の様子）

ト法)を実施した。また、海水を採取し、Fe濃度や栄養塩類(N、P、Si)等について水質分析した。

海藻繁茂の観測結果の一例としてコドラート調査の結果を図4に示す。天候や海況等の影響により年ごとに海藻量は異なるが、ホソメコンブを中心とした海藻繁茂量は対照区に比べて実験区で多い傾向が継続している。

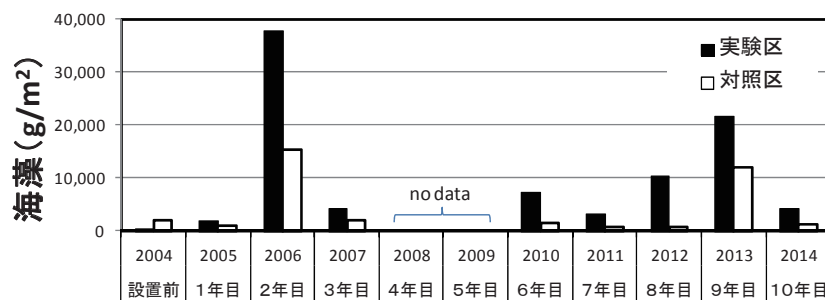


図4 海藻繁茂量の経年変化（コドラート調査結果）⁶⁾

海水中の窒素やリンの濃度は実験区と対照区で明確な差が見られなかった。一方、鉄濃度(溶存Fe)は極低濃度であったためJIS法(フェナントロリン吸光度法)で測定できなかったため、分析方法を検討し、実験方法の整った3年目以降に分析を行うようになり、その年(2007年)の6月にコドラート調査を行った観測点について水質調査も行ったところ図5⁷⁾に示すように埋設部である汀線部の近傍ほど高く、沖合に向かって低減する傾向が確認され、鉄分供給ユニットからのFeが溶出している可能性を明らかにすることができた。なお、検討した溶存Feの測定は、海水試料を0.45 μ mのメンブレンフィルターでろ過した後、キレート樹脂を用いた固相抽出でアルカリ金属イオン等の海水マトリクスを除去し、硝酸で溶離して、溶離液中のFeイオンをICP-MSで測定した。

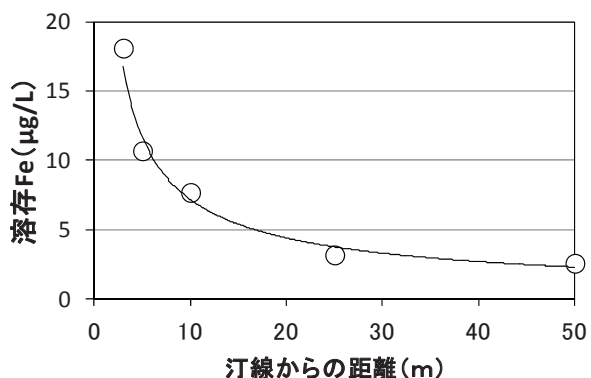


図5 実験区における海水中の溶存鉄分布測定例

対照区と実験区の溶存鉄濃度の経年変化は、図6に示すように、施工後5年目までは対照区に比べて実験区で高い傾向が観察された

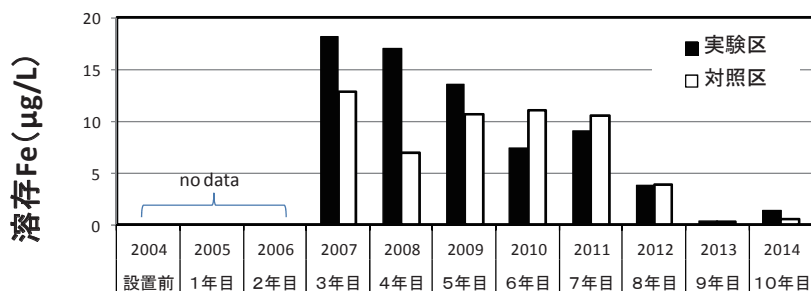


図6 海水中の溶存鉄濃度の経年変化⁶⁾

が、それ以降は顕著な差が確認できなかった。埋設した資材を掘り出してスラグの残存鉄濃度観測したところ、この実験条件下では4年ではほぼ半減していたことから鉄溶出量が少なくなったことが推定された。しかし、図4に示したように10年目になっても磯焼けに戻ることなくコンブの繁茂が観察されていることから、施工後の数年間である量のコンブ場を形成することができれば、持続的に自己再生産する場が復活するのではないかと推定している。

2) 北海道増毛町別荘地区における実証事業 (2014年～)

増毛町舎熊地区での結果を受け、実事業規模での藻場造成を再現するとともに、将来の事業化に向けた経済性データ(費用対効果など)を試算することを目指し、増毛漁協殿を事業主体として増毛町別荘地区において実証事業を開始した。2014年10月に別荘地区の海岸線300mにわたり25m間隔で、舎熊地区での実験相当のビバリー[®]ユニット埋設規模で6区画を施工した。今後数年かけて調査を継続して評価していく予定である。

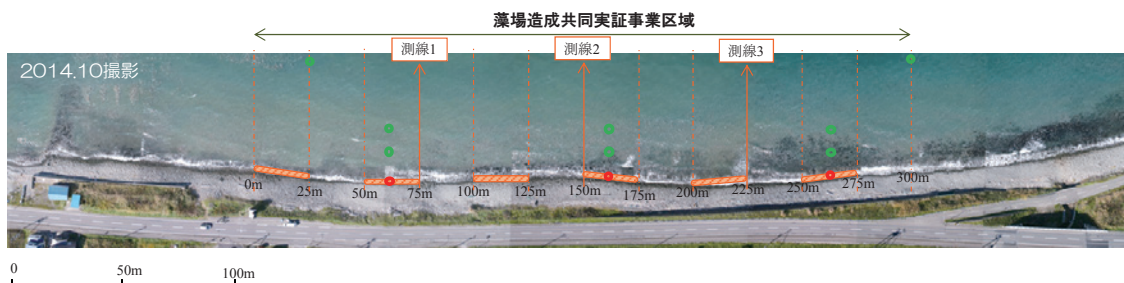


図7 増毛町別荘地区における大規模実証事業施工概要

4. おわりに

沿岸域の藻場の衰退は様々な要因が複雑に関わっており、鉄分供給のみで解決できるわけではなく、何らかの栄養不足が藻場形成の律速になっているのであるとすれば、窒素やりんを含めて海水の栄養塩や微量ミネラルの過不足を観測して必要な成分を適切に補うような取り組みが、技術的な課題があるとしても、必要ではないかと考えている。

また、実際の海域は、気象や海象など変動要因が多く、開発技術の有効性や持続性を検証することが困難なため、著者らはひとつでも多くの客観データを取るために2009年に海域環境シミュレーション設備(通称シーラボ; 図8)を開設し、検討を進めている。シーラボでは藻場や浅場を再現した水槽を設置し、沿岸海域環境や藻場再生に関する様々な模擬実験を実施してきた。現在までに、ノリの生長や色彩に及ぼす鉄分供給の効果の実証、カルシア改質材による底質環境改善効果の実証など実験データを取得してきた⁸⁾。さらに、2011年には海域利用時の

長期的な環境影響を評価することを目的として「シーラボⅡ」を増設した(図9)。この水槽設備は鉄鋼スラグ資材の実際の適用場を想定して干潟ゾーンと浅場ゾーンの備えた2段構造となっており、日照と水温の調節が可能な仕様とし、初代のシーラボでは困難であった年間を通じた実験データの蓄積が可能となり、現在、アサリの生育に及ぼす鉄鋼スラグ資材の影響に関する検証を行っている。

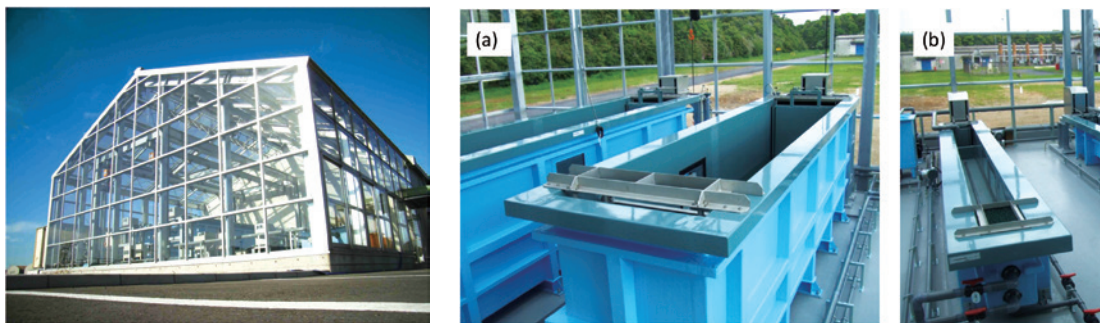


図8 海域環境シミュレーション設備(外観、(a)藻場水槽、(b)浅場水槽)



図9 海域環境シミュレーション設備「シーラボⅡ」

5. 引用文献

1. 藤田大介ほか：藻場を守り育てる知恵と技術、成山堂書店、東京(2010)
2. 水産庁：改定磯焼け対策ガイドライン(2015)
3. Yamamoto, M. et al. : J. Jpn. Inst, Energy, Vol.85, No.12, pp.971-978(2006)
4. Yamamoto, M. et al.: J. Chem. Eng. Jpn, Vol.43, No.7, pp.627-634(2010)
5. 加藤敏朗ほか：新日鉄住金技報、No.399、pp.79-84(2014)
6. 加藤敏朗：アロマティクス、Vol.67、春季号、pp.94-103(2015)
7. 加藤敏朗ほか：環境技術、Vol.42、No.7、pp.404-410(2013)
8. 加藤敏朗ほか：新日鉄住金技報、No.399、pp.85-89(2014)

転炉スラグ施用による水田からのメタンガス抑制

犬伏 和之

千葉大学大学院園芸学研究科

1. はじめに

メタン (CH_4) は1分子当たり二酸化炭素 (CO_2) の約 25 倍の地球温暖化係数を持っており、温室効果の約 15%は CH_4 に起因すると推定されている。中でも水田土壌は CH_4 総放出量の約 1 割を占めている。水田土壌中の鉄の役割とメタン生成については、Takai(1970)による酸化還元理論を元に、浅見・高井(1970)が培養試験でその関係を解析し、土壌中に遊離鉄（湛水土壌状態で還元されうる鉄量）とメタン生成量との間に負の相関関係があることが見出されている。Inubushi ら(1990)も国内長期肥料連用試験水田土壌を用いて培養試験で両者の同様な関係を確認している。その後、吉羽ら(1996)および Furukawa and Inubushi (2002)が含鉄資材によるメタン放出の抑制を水稻栽培ポット試験で明らかにしてきた。

ここで鉄資材施用時に土壌の還元状態で生じている有機物分解の一連の流れについて考え直したい。鉄資材に含まれる成分で、有機物分解に影響を及ぼしていると考えられる成分は主に 2 つである。酸化鉄とアルカリ分である。この 2 つの成分が有機物分解に影響を及ぼしている経路としては次の 3 通りが考えられる。①酸化鉄の影響によるメタン生成抑制 ②アルカリ分による有機物分解の促進 ③①と②が同時に起きる場合である。

① 酸化鉄を土壌に施用すると、酸化鉄が土壌の中で電子受容体としての役割を果たすことから、強還元になることを抑制し、嫌気性古細菌であるメタン生成菌活性を抑制する。この場合、有機物はメタン生成菌に利用されずに通性嫌気性菌に利用されることからメタンではなく二酸化炭素として分解される。すなわち酸化鉄はメタン生成量を抑制し、二酸化炭素生成量を増加させる。そして $\text{CH}_4 + \text{CO}_2$ の値は変わらないと考えられる。酸化鉄はメタン生成菌に間接的にメタン生成菌に影響を及ぼしているだけではない。鉄還元菌が 3 価の鉄を電子受容体とし、酢酸を基質として利用して生存していることが知られている (Takai 1970)。この鉄還元菌とメタン生成菌とが基質を競合することからメタン生成が抑制され、二酸化炭素生成量の促進が進むと考えられる。

② アルカリ分を湛水した土壌に施用すると、腐植物質が開膠し、易分解性の有機物が溶出する。このことから、メタン、二酸化炭素いずれかが増加し、片方の生成量は変わらない。もしくはメタン、二酸化炭素ともに生成が促進することが予想される。よって $\text{CH}_4 + \text{CO}_2$ の値は増加する。

③ 酸化鉄とアルカリ効果が同時に起きると仮定すると、メタン生成は抑制され二酸化炭素生成量が増加する。もしくは鉄の影響というものが表面上分からなくなり、二酸化炭素生成量、メタン生成量ともに増加することが考えられる。

すなわち、これらのことからメタン生成が抑制されたかどうかを考えるためには、メタン生成量のみならず目を向けるのではなく、有機物分解全体の流れを捉え、二酸化炭素生成量と、メタン生成量 + 二酸化炭素生成量に注目し、その中でメタン生成量やメタン生成

の割合について考えることが必要ではないかと考えた。そこで、東南アジア 4 カ国の水田土壌を用いて、メタン生成量のみならず二酸化炭素生成量の分析を行い、鉄資材を添加して培養試験を行った。

2. 材料および方法

2-1. 供試土壌、供試資材とその理化学性

タイ、インドネシア、フィリピン、ベトナムの各地域から採取した水田土壌の理化学性について分析を行った。初めに各土壌を風乾し、その 5g をネジロ試験管に入れた。そこに資材 0mg(無施用区)または資材 250mg(土壌に対して 5%)添加して、純水 5mL を加えた。資材はオキシ水酸化鉄、市販の鉄資材 4 種類を供試した。オキシ水酸化鉄は Schwertmann and Thalman (1976)の方法により合成した。その他に市販されている資材を 4 種類利用した。鉄資材の pH は、資材に含まれる CaO 含量と対応していた。全鉄含量は、資材①が 32.21%、資材②が 19.2%、資材③が 16.99%、資材④が 9.71%であった。

2-2. 培養方法

純水を加え 1 時間静置後に軽く振盪し上澄みの pH を測定した。これを培養初期 pH とする。pH 測定後にネジロ試験管の気相を窒素で置換した。置換する時間は 2MPa で 1 分間置換すればほぼ 100%置換できることが予備実験にて分かったが、念のため 2MPa、2 分間を 2 回行った。培養は 30°C で 8 週間行い、培養開始から 7,14,21,28,42,56 日目にメタンおよび二酸化炭素の生成量を測定した。測定後さらに上澄みの pH を測定した。これを培養後期 pH とする。pH 測定後はアンモニア化量および二価鉄の分析を行った。

2-3. メタン生成とその解析方法

無施用区のメタン生成量の推定として、単相関分析、重回帰分析、そして Cheng et al. (2007)と同様の方法によってメタン生成量の解析を行った。その後、無処理区と資材添加区とを比較し、資材の施用がメタン性にどのような影響を及ぼすか解析を行った。

2-4 電子線マイクロアナライザー(EPMA)による含鉄資材の溶出解析

ケイ酸含有スラグ肥料を樹脂に埋め込み水田に 75 日間埋設し回収後 EPMA 解析した。

3. 結果および考察

培養試験の結果、次表のようにメタン生成およびメタン+二酸化炭素生成と 2 価鉄生成量、無機化窒素量、土壌全炭素量などが正の相関を示した。また図のようにメタン生成量と遊離鉄量は負の相関関係を示した。別途、東南アジア 4 カ国の試験研究機関・大学との共同研究による水稻栽培試験でも、メタン放出の抑制と水稻収量の増加が確認された。また EMPA 解析によりケイ酸含有スラグ肥料中の Si、Ca、Fe、Mn などの水田での溶出が確認された(Ito et al., 2015)。以上より、転炉スラグ施用による水田からのメタンガス抑制の可能性が示された。地球環境保全と持続的農業発展のために、さらなる利用の促進を期待したい。

	CH4	CO2	CH4 + CO2	Total Fe	Free Fe	Ferric	Mineralizable-N	Total C	Total N	C/N	培養初期 pH	培養終期 pH	Hexose
CH4		0.34	0.76	0.39	0.41	0.05	0.43	0.22	0.21	0.33	0.26	0.30	0.47
CO2			0.87	0.39	0.33	0.65	0.88	0.76	0.75	0.30	0.27	0.16	0.57
CH4 + CO2				0.06	0.01	0.42	0.84	0.64	0.63	0.38	0.32	0.27	0.64
Total Fe					0.78	0.66	0.34	0.24	0.32	0.15	0.24	0.37	0.07
Free Fe						0.62	0.16	0.31	0.27	0.08	0.10	0.19	0.10
Ferric							0.51	0.39	0.38	0.07	0.07	0.36	0.04
Mineralizable-N								0.75	0.79	0.19	0.08	0.11	0.50
Total C									0.95	0.49	0.22	0.28	0.35
Total N										0.33	0.17	0.22	0.45
C/N											0.48	0.66	0.02
培養初期 pH												0.74	0.29
培養終期 pH													0.20
Hexose													

Table Correlation coefficient among soil properties and methane production

黄色は Pearson の相関係数において 1%水準で有意であることを示す。

赤色は Pearson の相関係数において 5%水準で有意であることを示す。

(数値は相関係数 R を示す)

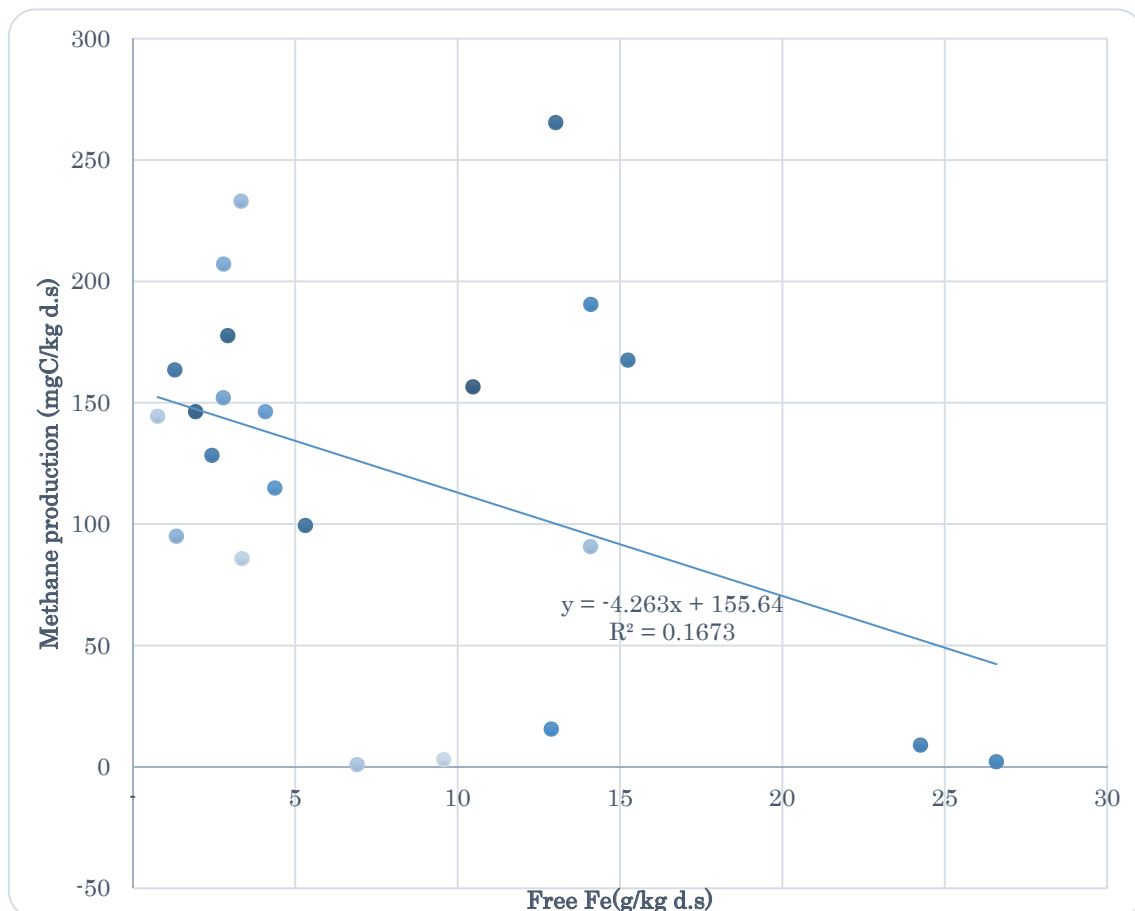


Fig. Relationship between free Fe and methane production in Southeast paddy soils.

引用文献

- 浅見輝男・高井康雄（1970）水田土壤中における遊離鉄の行動に関する研究（第4報）水田土壤中における遊離鉄の還元と各種ガス代謝、土肥誌、41(2)48-55.
- 吉羽雅昭・森村 大樹・麻生 昇平・武長 宏（1996）、酸化鉄、マンガン(IV)、硫酸根資材添加による湛水土壤のメタン生成抑制、土肥誌、67(4)362-370.
- Furukawa, Y., and Inubushi, K. (2002): Feasible suppression technique of methane emission from paddy soil by iron amendment, *Nutrient Cycling in Agroecosystems* 64(1-2), 193-201.
- Takai, Y. (1970) The mechanism of methane fermentation in flooded paddy soil, *Soil Science and Plant Nutrition*, 16(6), 238-244.
- Inubushi, K., Umebayashi, M., and Wada, H. (1990) Methane emission from paddy field, 14th International Congress of Soil Science, Transactions, II-249-254.
- Ito, K., Endoh, K., Shiratori, Y. and Inubushi, K., (2015) Silicon elution from three types of steel slag fertilizers in paddy field analyzed by electron probe micro analyzer (EPMA), *Soil Science and Plant Nutrition* 61 (2015) in press

農研機構東北農業研究センターシンポジウム
「鉄鋼スラグは有望な農業資材となり得るか？
—農業分野での技術開発の可能性を探る—」
—講演要旨集—

発行年月 : 2015年11月

編集・発行 : 農研機構東北農業研究センター

〒020-0198 岩手県盛岡市下厨川字赤平4

