

溶融スラグの水稻育成への適用

～日本初の一般廃棄物溶融スラグの肥料化～

Application of the slag to paddy rice cultivation
～Japan's first use of the general waste slag as fertilizer～

住 健太郎 Kentaroh SUMI
環境ソリューション事業部 技術部
資源化推進室 マネジャー

宮谷 寿博 Toshihiro MIYATANI
環境ソリューション事業部 技術部
資源化推進室 シニアマネジャー

関 勇治 Yuuji SEKI
環境ソリューション事業部 技術部
資源化推進室 マネジャー

梶山 博久 Hirohisa KAJIYAMA
環境ソリューション事業部 技術部
資源化推進室長

永田 俊美 Toshimi NAGATA
環境ソリューション事業部 技術部長

小野 義広 Yoshihiro ONO
環境ソリューション事業部 事業企画室
シニアマネジャー

抄 録

当社のシャフト炉式ガス化溶融炉より産出される溶融スラグは、発生スラグ全量を有効利用し、当社溶融炉の差別化技術となっている。しかし、溶融スラグ市場の半数以上を占める公共工事発注量は年々減少しており、今後も安定的に発生するスラグ全量を有効利用するためには新規用途開発が必要不可欠である。そこで、溶融スラグに含まれる可溶性けい酸とカルシウムに着目し、それら成分の水稻生育効果の確認を行い、一般廃棄物溶融スラグとしては日本で初めてけい酸質肥料として仮登録認定された。ここでは、溶融スラグの水稻生育効果試験結果について報告するとともに、水稻以外の農業分野への用途拡大についても紹介する。

Abstract

Slag discharge from our company's direct melting system, which is used effectively is the differentiation technology. However the order quantity of public works, which occupy 50% of slag market is descending year by year. To utilize total amount of slag efficiently and stably in the future, development of new applications is indispensable. We focused on soluble silicic acid and calcium included in slag, and confirmed that they have an effect on the growth of paddy rice. The general waste slag registered tentatively as siliceous fertilizer for the first time in Japan. We report on results of paddy rice growth effect test, and introduce the expansion of the application for the agriculture field other than paddy rice.

1 緒言

当社のシャフト炉式ガス化溶融炉より産出される溶融スラグは年間約20万トン(2016年度、稼働施設32)であり、その全量を有効利用している。利用用途はアスファルト混合物向け骨材、コンクリート二次製品向け細骨材及び埋戻し材使用が主要用途であ

り、その内、60～70%は公共工事向けに利用している。しかし、公共工事発注量が年々減少しており、今後も安定的にスラグの有効利用を継続するためには、新規用途開発が必須である。新規用途開発の一環として当社は溶融スラグの地産地消を目指して農業分野、特に水稻分野への利用に取り組んできた。2012年度より静岡市、静岡大学及び当社による産官

学体制により、静岡市西ヶ谷清掃工場の熔融スラグを利用した水稻生育評価試験を行った。また、並行して農林水産省と肥料登録協議を行い、当社熔融スラグの肥料効果と安全性が認められ、2017年3月に日本で初となる一般廃棄物熔融スラグのけい酸質肥料の仮登録が認定された(登録名称：ディーエムケイカル)。

以下に、当社熔融スラグの水稻生育評価試験結果について紹介するとともに、水稻以外の農業分野への取り組み状況についても紹介する。

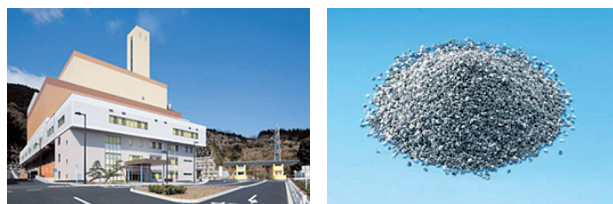


図1 静岡市西ヶ谷清掃工場及び熔融スラグ
Fig. 1 Shizuoka city Nishigaya incineration plant and slag

2 熔融スラグの特徴

当社のシャフト炉式ガス化溶融炉は一般廃棄物中の灰分(Ca, Si, Al)及び副原料(コークス, 石灰石又はけい砂)の灰分を高温溶融し、これを水冷(急冷)処理することにより、けい酸(SiO₂)や石灰分(CaO)及び酸化アルミ(Al₂O₃)を主成分とする熔融スラグが生成される。この時、熔融スラグに含まれるけい酸や石灰分は可溶性となる。また、当社溶融炉の場合、一般廃棄物と共にコークスを溶融炉に投入することにより、溶融炉の炉底部が1700℃～1800℃の高温の状態となり処理物中灰分を完全溶融するとともに炉内が高温還元雰囲気となる。このため、熔融スラグは一般廃棄物に含まれる鉛などの低沸点重金属類が揮発し排ガス系に移行することで、重金属等の有害物質をほとんど含まない安全な品質となる。さらに、一般廃棄物と共に投入する石灰石(又はけい砂)は、熔融スラグの成分を定期的に測定し投入割合を調整しており、これにより熔融スラグ主成分を安定化させるとともに出湯時の溶融物の流動性が向上(さらさら流れる状態)することで、安定排出を可能にし、スラグとメタルが容易に比重分離する。その結果、水砕処理後、磁選することで溶融スラグは金属類をほとんど含まない、天然材料と同

等の安全性を有する品質となる。図2に当社シャフト炉式ガス化溶融炉の概要、表1及び表2に当社熔融スラグの有害物質含有量及び溶出量とそれぞれのJIS基準値(JIS A 5031：一般廃棄物, 下水汚泥又はそれらの焼却灰を溶融固化したコンクリート用熔融スラグ骨材)を示す。表1及び表2に示す通り、当社の熔融スラグは有害成分含有量及び溶出量がJIS基準値を大幅に下回っており、アスファルト混合物やコンクリート二次製品の骨材をはじめとする土木用材料として幅広く使用されている。

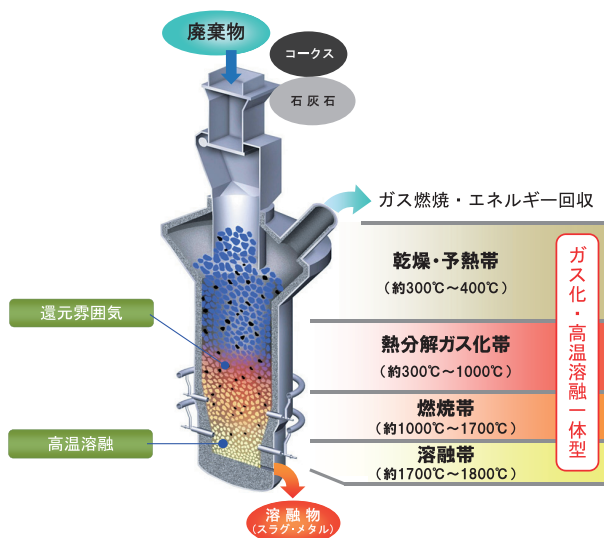


図2 シャフト炉式ガス化溶融炉の概要
Fig. 2 Overview of the direct melting plant

表1 熔融スラグの有害物質含有量(例)
Table 1 Hazardous substance content of slag

項目	単位	含有量	基準値
カドミウム	mg/kg	<10	≦150
鉛	mg/kg	<15	≦150
六価クロム	mg/kg	<10	≦250
ひ素	mg/kg	<10	≦150
総水銀	mg/kg	<1	≦15
セレン	mg/kg	<10	≦150
ふっ素	mg/kg	<400	≦4000
ほう素	mg/kg	<400	≦4000

表2 熔融スラグの有害物質溶出量(例)
Table 2 Hazardous substance elution amount of slag

項目	単位	溶出量	基準値
カドミウム	mg/L	<0.001	≦0.01
鉛	mg/L	<0.005	≦0.01
六価クロム	mg/L	<0.02	≦0.05
ひ素	mg/L	<0.005	≦0.01
総水銀	mg/L	<0.0005	≦0.0005
セレン	mg/L	<0.002	≦0.01
ふっ素	mg/L	<0.08	≦0.8
ほう素	mg/L	<0.1	≦1.0

3 ディーエムケイカルの肥料成分

スラグの水稲生育肥料としては、鉄鋼スラグを原料とした鉱さいけい酸質肥料(登録名称：ケイカル)がある。当社溶融スラグ(以下、「ディーエムケイカル」と呼ぶ。ディーエムケイカルは肥料仮登録時の登録名称であり、商標登録済みである。)も同様の成分組成を持つことから、ケイカル同様にけい酸質肥料としての水稲生育効果があると期待された。表3に、ディーエムケイカルの主成分を示す。また、表4にディーエムケイカルとケイカルのけい酸質肥料成分を比較したものを示す。

表3 ディーエムケイカルの主成分(%)
Table 3 Main component of slag

項目	二酸化けい素 (SiO ₂)	酸化カルシウム (CaO)	酸化アルミニウム (Al ₂ O ₃)
分析値	35.4	37.6	19.4

表4 けい酸質肥料成分(%)比較
Table 4 Component comparison of siliceous fertilizer

項目	可溶性けい酸	アルカリ分	く溶性苦土(Mg)
ディーエムケイカル	31.8	35.6	1.53
ケイカル	31.6	48.0	5.99

けい酸質肥料の各肥料成分の性質については、以下の通りである。

- ・可溶性けい酸：葉、茎、根の生育促進に加え、受光態勢が向上するため光合成能力が高まることにより、玄米の登熟が向上する。葉やわらの表面を強く(固く)するため、病害虫に対する抵抗力を上げ、台風等による倒伏防止につながる。
- ・アルカリ分：カルシウム分が主で、土壌の酸性化を改良し、中性土壌に近づける効果がある。
- ・く溶性苦土：マグネシウムのことで、植物の栄養成分を供給する。

4 ディーエムケイカルの水稲生育評価試験

ディーエムケイカルの水稲生育評価試験を行った。試験はポット(植木鉢)試験と圃場(水田)試験を

それぞれ日本肥糧検定協会と静岡大学にて行った。

4-1 ポット試験(2013年実施)

ポット試験にはa/5000ワグネルポット(断面積が200cm²の植木鉢)を使用し、ポット内に使用する土は表5の性状のものを使用した。

表5 供試土壌の分析成績
Table 5 Analysis results of soil

採取地	沖積土 洪積土の別	ph	電気伝導率 dS/m	陽イオン交換容量 meq/乾土100g	容積重 g/mL	最大容水量 g/乾土100g
徳島県	沖積土	5.7	0.11	17.1	1.18	62.0

りん酸 吸収係数	可給態りん酸 mg/乾土100g	交換性塩基 mg/乾土100g			可給態けい酸 mg/乾土100g	T-N %	T-P ₂ O ₅ %	T-K ₂ O %
		CaO	MgO	K ₂ O				
680	11	325	48	13	9.6	0.18	0.17	0.16

土が植物に対して供給可能なけい酸の量を表す可給態けい酸量と土のpHは一般的な土壌としては共にやや低めの土を使用することで、試験によるけい酸とアルカリ分の効果が比較的表れやすい環境とした。

ポットに上記の土を敷いた後、ディーエムケイカルを施肥したもの、比較肥料としてケイカルを施肥したもの、及びスラグ無しのをそれぞれ用意し、そこに水稲(“コシヒカリ”)を植苗し、同条件のもとで稲穂の収穫までの生育比較を実施した。

ディーエムケイカルとケイカルの施肥量は120kg/10a(約2g/ポット)を基準とし、試験には基準量区と基準量の2倍を施肥した2倍量区を設置し、それぞれの生育状況をスラグ無し(対照区)のものと比較した。生育の過程においては、すべてのポットに水稲の生育に必要な一般肥料成分として窒素、リン酸、カリウムの施肥を適宜行った。

試験としては、収穫した水稲の重量と水稲中のけい酸含有量とを測定することにより、水稲がけい酸を吸収した量を求めた。水稲は茎部と穂部に分けて評価することとし、それぞれの代表部位としてわらと粃についてけい酸吸収量を算出し比較を行った。図3にポット試験の様子と図4に試験結果を示す。

ディーエムケイカルを施肥した場合、水稲のわら、粃のけい酸吸収量は、対照区に対して10~25%程度の吸収量がアップすることが分かった。また、比較肥料(ケイカル)とは同等の傾向であり、施肥量を2倍にしても発育障害にならなかった。

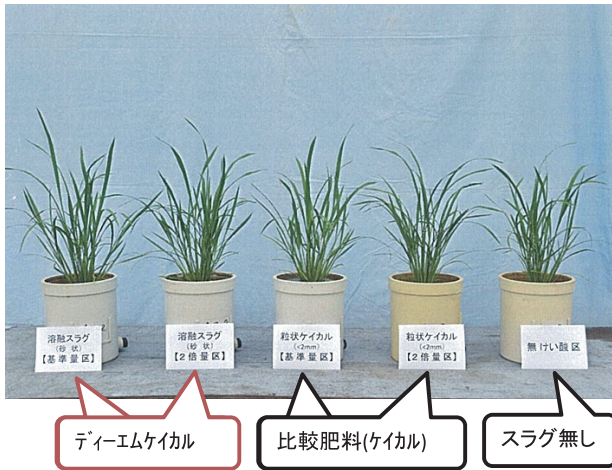


図3 ポット試験の様子
Fig. 3 State of pot test

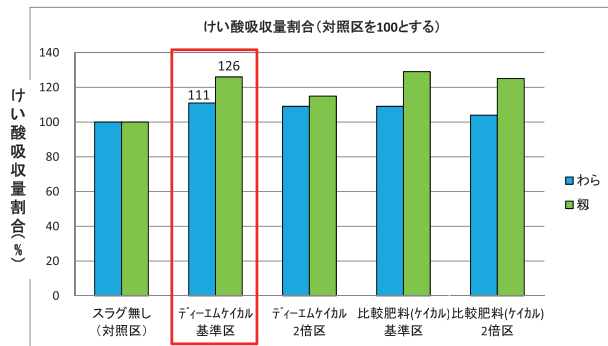


図4 けい酸吸収量割合(対照区を100とする)
Fig. 4 Absorption rate of silicic acid(The control group as 100)

4-2 圃場試験(2013~2015年実施)

水稻の圃場試験は、静岡大学農学部内の試験用水田にて実施した。使用した水田の土壌の性状を分析した結果を表6に示す。

表6 圃場の土壌分析結果
Table 6 Soil analysis results of the paddy field

採取地	沖積土 洪積土の別	pH	電気伝導率 dS/m	陽イオン交換容量 meq/乾土100g	容積重 g/mL	最大容水量 g/乾土100g
静岡市	沖積土	6.1	0.06	14.8	1.08	61.5

りん酸 吸収係数	可給態りん酸 mg/乾土100g	交換性塩基 mg/乾土100g			可給態けい酸 mg/乾土100g	T-N %	T-P ₂ O ₅ %	T-K ₂ O %
		CaO	MgO	K ₂ O				
910	6.3	264	38	6.7	20.1	0.21	0.16	2.04

表6に示す土壌のpH及び可給態けい酸量は、ともに平均的な数値であり、土壌としては一般的なものと言える。

水稻の品種は“コシヒカリ”を使用し、圃場試験においても前述のポット試験と同様に、ディーエムケイカルの基準量区には120kg/10a相当を施肥し、

比較対象としてディーエムケイカルの2倍量区、比較肥料(ケイカル)には120kg/10a相当を基準量区、同2倍量区及びスラグ無し(対照区)の区画を設け、図5のように水田区画し(1区画=6×5m)比較した。圃場試験の様子を図6に示す。

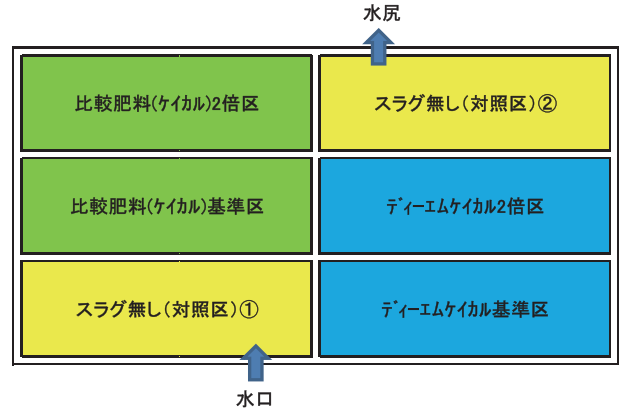


図5 試験水田区画
Fig. 5 Compartment of the test paddy



図6 圃場試験の様子
Fig. 6 State of paddy field test

圃場試験の場合も、すべての試験区に対して、基肥及び追肥として窒素、リン酸、カリウムを静岡県基準にしたがって施肥した。収穫量調査は図7のように各試験区をさらに外周部を除き5つの区画

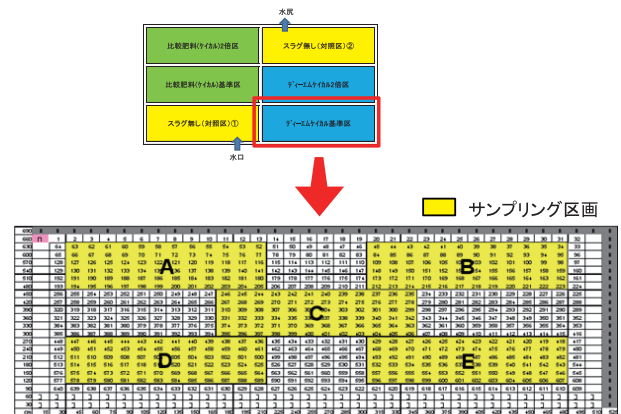


図7 各試験区内のサンプリング区画割り
Fig. 7 Sampling subdivision of each of the test section

(A～E)に分け(1区画当たり6×12株), 各区画から10個体をランダムに選抜したものを計測した。図8に収穫の様子を示す。



図8 収穫の様子
Fig. 8 State of the harvest

図9に試験による籾重量と玄米重量の重量比較結果を示す。ディーエムケイカルを施用した場合、スラグ無しの対照区に対して20～30%の収穫量が増加し、比較肥料であるケイカルとはほぼ同等の結果が得られた。また、施肥量を2倍にしても発育障害にならなかった。

図10には、各試験区の籾殻とわらのけい酸吸収量(総量)を測定し比較した結果を示す。けい酸の吸収

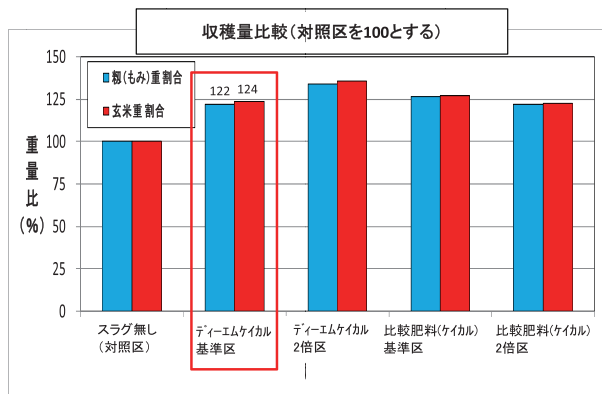


図9 籾重、玄米重の重量比較結果
Fig. 9 Weight comparison result unhulled rice and brown rice

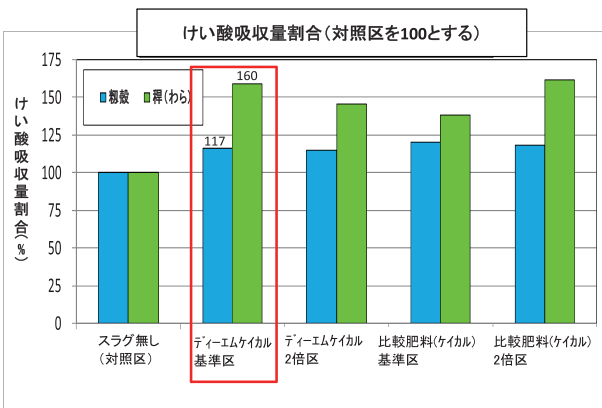


図10 けい酸吸収量割合(対照区を100とする)
Fig. 10 Absorption rate of silicic acid(The control group as 100)

量はディーエムケイカル基準区及び2倍区は対照区に対して20～50%程度の増加が見られ、比較肥料(ケイカル)と同程度であることが分かった。このことからディーエムケイカルを施肥した試験区においては、けい酸の吸収が十分に行われており、その結果として重量の増加につながったと考える。

4-3 玄米の食品検査結果

玄米の有害元素分析を行った結果を表7に示す。表7に示すように、ディーエムケイカル基準区の玄米中における重金属含有量はいずれも基準値以下であり、対照区と比較しても同程度の結果となり、安全性が確認された。

表7 玄米の有害元素分析結果
Table 7 Harmful elemental analysis of brown rice

測定項目	対照区	ディーエムケイカル基準区	基準値
カドミウム(Cd)	ppm 0.04	0.05	0.4以下
鉛(Pb)	ppm 不検出	不検出	—
水銀(Hg)	ppm 不検出	不検出	—

玄米の米粒食味分析を行った結果を表8に示す。玄米中のアミロース、タンパク質及び脂肪酸度を測定し、これらの値から換算される食味値は通常70点以上であれば良質の米と評価され、対照区と比較しても同等以上の結果であり、食味の観点からも熔融スラグを施肥した玄米の品質改善効果が確認された。

表8 玄米の米粒食味分析
Table 8 Taste analysis of brown rice

測定項目	対照区	ディーエムケイカル基準区
食味値	点 74 普通	76 やや良
アミロース	% 19.1 普通	18.9 普通
タンパク質	% 7.8 普通	7.6 普通
脂肪酸度	KOHmg /100g 15.1 普通	16.4 普通

前述のように、日本肥糧検定協会と静岡大学におけるディーエムケイカルを使用した水稲生育比較試験の結果、当社熔融炉から生成される熔融スラグ(ディーエムケイカル)の安全性及び品質の安定性が確認された。これらの結果をもとに、静岡市西ヶ谷清掃工場のディーエムケイカルがけい酸質肥料として農林水産省から仮登録(仮登録とは肥料取締法に公定規格の定めがない肥料を肥料登録しようとする

際、仮に定めた公定規格に則って運用される状態を言う。通常は数年の仮登録運用期間を経て同法に新たに公定規格が制定され本登録となる。)を2017年3月27日付で(株)エヌジェイ・エコサービス(当社溶融スラグの販売代理店)が受領した。

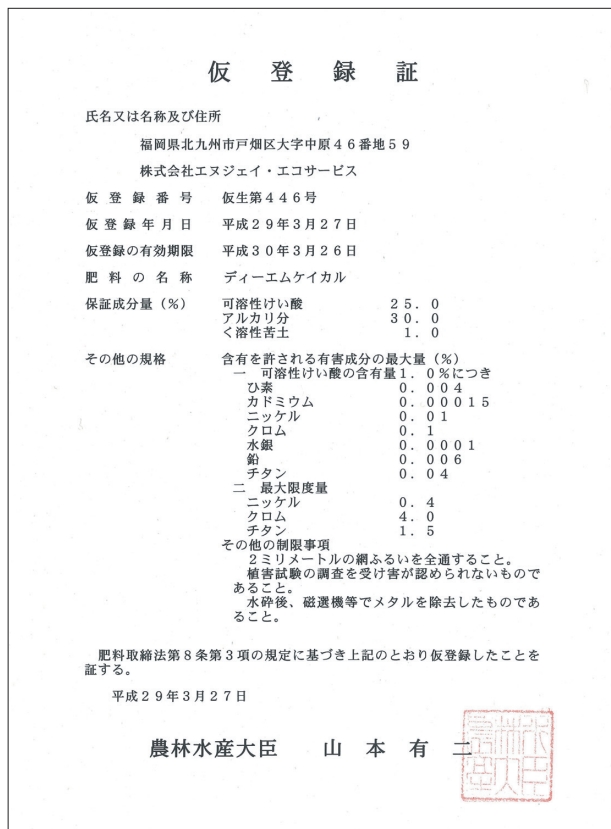


図11 肥料仮登録証
Fig. 11 Fertilizer provisional registration certificate

5 水稲以外の農業分野や芝生育成への取り組み

上述より、ディーエムケイカルが水稲の生育に対し一定の効果があることがわかった。当社では更なる肥料化取り組みとして、ディーエムケイカル成分特徴(可溶性けい酸、アルカリ分を大量に含む)を活かして、芝生の育成用としてのゴルフ場への展開及び、水稲以外の農業分野(イネ系植物)への利用拡大に取り組んでいる。以下に、それらの取り組みについて紹介する。

5-1 ゴルフ場芝生生育用

芝はイネ科の植物であり、ゴルフ場、主にフェアウェイ用芝生の生育用には、可溶性けい酸は有効で

あることより、芝生用目土としてのディーエムケイカルの使用及び、基盤材として土とディーエムケイカルとの混合利用を推進している。これらの取組は2011年頃から始まり、昨年度(2016年度)には全国14ヶ所のゴルフ場に合計約5,700トンの利用がある。



図12 ゴルフ場の芝生目土に使用
Fig. 12 Golf course turf soil

5-2 マコモダケの生育用

マコモダケ(図13参照)はイネ科マコモ属の多年草であり、水稲と同様に、静岡大学農学部内の試験水田において、マコモダケ(品種：青殻(あおがら))の生育比較試験を実施中である。



図13 マコモダケの収穫品
Fig. 13 The harvested products of Makomodake

図14にマコモダケの生育比較試験状況を示す。(赤枠部にディーエムケイカルを使用)



図14 マコモダケの生育比較試験状況
Fig. 14 Growth comparison test situation of Makomodake

5-3 サトウキビの生育用

サトウキビはイネ科サトウキビ属の植物であり、静岡大学農学部監修の下、鹿児島県奄美大島にて生育比較試験を実施中である。図15はサトウキビ植付後約1年経過段階での生育状況を示したものである。ディーエムケイカル利用領域はサトウキビの草丈が約2.3m程度であり、従来領域の約2.0mに比べ、生育に差があることが確認できる。

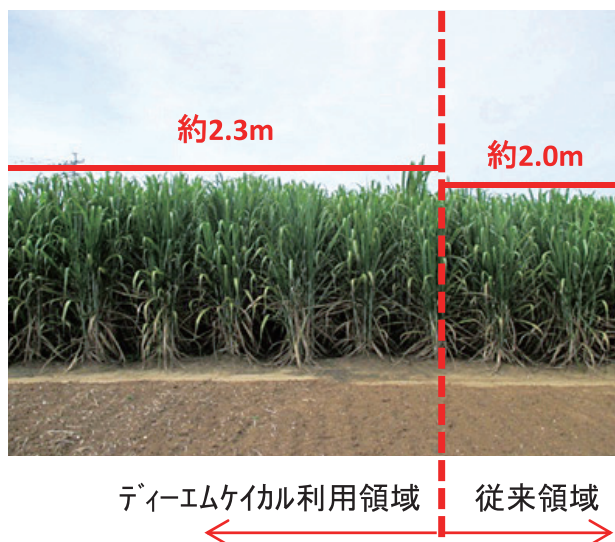


図15 サトウキビの生育比較試験状況
Fig. 15 Growth comparison test situation of sugar cane

6 結言

水稻の生育評価試験を通して、当社溶融スラグ（ディーエムケイカル）が水稻の生育に対し、有効な肥料効果を発揮することが確認され、一般廃棄物溶融スラグとしては日本初となる、けい酸質肥料への仮登録を受領できた。今後は、静岡市西ヶ谷清掃工場の溶融スラグの本登録を目指すと共に、その他の地域においても、当社溶融スラグの肥料化を各自治体と協力して進めていく。

溶融スラグの肥料としての利用は、最終処分場の極小化という従来の社会貢献に加え、我が国の食料自給率の改善（食の安全保障への貢献）や、イネの成長率増に伴うCO₂吸収量の増（地球温暖化防止への貢献）という新しい形での貢献が期待できる。

当社は、シャフト炉式ガス化溶融炉の技術及びそこから産出される溶融スラグの用途開発を通じ、多様な資源循環型社会の実現に向けて今後も取り組ん

でいく所存である。

最後に、各種生育評価試験の実施に当たり、多大なるご協力を賜りました静岡大学農学部の森田教授と一家准教授に厚くお礼申し上げます。

参考文献

- 1) 財団法人日本肥糧検定協会：「溶融スラグ」の水稻に対する肥料効果試験(2013)
- 2) 静岡大学大学院農業研究所 森田明雄, 一家崇志：溶融スラグがイネ“コシヒカリ”の育成に及ぼす影響(2014)
- 3) 静岡大学 森田明雄, 一家崇志：水稻育成への溶融スラグの適用について 産業機械 2017.6 No.801 p14-16
- 4) 一般社団法人日本産業機械工業会エコスラグ利用普及委員会：エコスラグ有効利用の現状とデータ集 2016年度版 p97-99