



“スーパーケイサン”ご提案資料

水稻におけるケイ酸栄養の重要性は明治の頃より指摘されてきました。欧州では、中世の頃よりスギナ(多量のケイ酸を含む)の抽出液が利用されてきました。特に水稻におけるケイ酸栄養の重要性は誰しもが認めるところです。最近では夏期高温と後期栄養不足による登熟不全等が全国的に問題になっています。ケイ酸は夏期高温障害の軽減にも役立ちます。

1990年代後半以降、世界的にケイ酸研究の機運が高まり、それまでとは全く異なった新しい知見が得られてきました。ケイ酸には様々な生理作用があること、ある種の病害に対する抵抗性が誘導されることなど、非常にダイナミックな生理活性を有していることが明らかにされました。ところが、近年ケイ酸の天然供給量は減少傾向にあるにもかかわらず、生産者のケイ酸離れが進んでいるようです。施用効果が非常に高いシリカゲルが開発され、弊社でも早くからシリカゲルに取り組み、シリカゲルを主材とした製品「スーパーケイサン」を開発いたしました。

水稻におけるケイ酸栄養の重要性を再確認していただきたく、ケイ酸質肥料「スーパーケイサン」を紹介させていただきます。



SHK

環境適応力を高めるケイ酸

1

図 ケイ酸を吸収しないイネはほとんど実らない(Ma, J. F., et al. 2006)

表 ケイ酸施用が光合成と収量に対する効果(安藤ら1997)

シリカゲル 施用量 (kg/10a)	ケイ酸濃度 (g/kg)	みかけの 光合成 (8/29)	根の吸水力 (μL/時)	収量 (kg/10a)
0	12.8	13.5	32.6	549(100)
25	13.3	15.5	34.7	589(107)
200	16.9	17.6	38.5	631(115)

品種: はえぬき 元肥N6kg/10a+追肥N2kg/10a

図 ケイ酸濃度が高いほど心白が少ない (富山農技)

図 ケイ酸濃度が高いほど病害発生が少ないもち病と葉鞘褐変病の例(北海道中央農試)

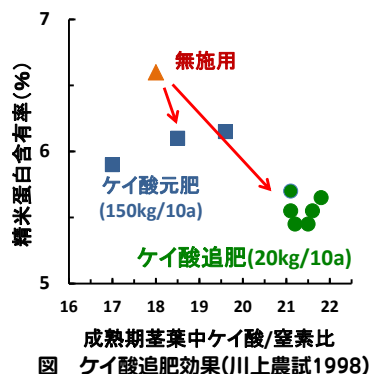
水稻は一般の作物に比べ、非常に大量のケイ酸を吸収します。反面カルシウム(石灰)は僅かしか吸収しません。水稻のケイ酸吸収量は、窒素の10倍あるいはそれ以上です。岡山大学の馬教授らは、ケイ酸をほとんど吸収しないイネを選抜しています。写真では分かりにくいのですが、ケイ酸を吸収しないイネのみは黒く変色し、ほとんど実をつけていません。水稻はケイ酸が供給されないとともに実ることはありません。キュウリやトマトでも厳密なケイ酸欠栽培を行うと障害が発生します。ところが、ケイ素は植物の必須元素とはなっていません(人では必須元素)。ケイ素は、唯一過剰害のない元素です。近代ケイ酸研究の先駆者である京大名誉教授の高橋英一先生は、著書の中で「環境適応力を高める有用元素」と表しています。

左の表は、安藤ら(1997)の試験結果からの抜粋です。葉身中のケイ酸濃度を高めることで光合成と根の活性が向上し、収量が増加することが示されています。

左のグラフは、富山県農業技術センターで行われたケイ酸濃度と心白粒の関係を見たものです。ケイ酸によって光合成が高まり、米への同化産物の供給量が多くなり、心白粒を減らすことを示しています。低タンパク化にも有効に働くことが分かっており、米品質の向上にもケイ酸が重要であると言えます。中央と右の2つのグラフは、ケイ酸濃度といもち病、葉鞘褐変病の発生が反比例していることを示しています。

水稻にとって、大量に吸収するケイ酸は、生育・収量の確保のみならず米品質の向上、病害虫軽減にとって重要な働きをもっていることが分かります。

収量水準を保ちながら米の蛋白含有率を下げる ケイ酸/窒素比を高め、窒素玄米生産効率を上げる



- 窒素量と米粒中蛋白含量は比例する
- ケイ酸は**窒素玄米生産効率**を高める
窒素玄米生産効率とは、吸収窒素当たりの炭水化物生産量のこと
- **窒素玄米生産効率**を高めれば、米粒への転流量が増え、米粒中蛋白含量は相対的に減らすことができる
- ケイ酸は**窒素玄米生産効率**を高める
(宮森1996)

図 ケイ酸追肥効果(川上農試1998)

全ケイ酸吸収量の6割は幼穂形成期移行に吸収
…ケイ酸追肥の有効性

幼穂形成期のケイ酸追肥が奨励されています。土壌に含まれる可給態ケイ酸の含有量や使用する肥料の違いによって効果の現れ方は違ってきますが、出穂の30日前を目安にケイ酸質肥料を追肥すると、登熟を改善することが示されています。

窒素玄米生産効率(宮森1996)という考え方が示されています。生産量を維持するためにはそれに見合う窒素を施用しなければなりません。窒素吸収量と米中蛋白含有率は比例します。では、収量水準を保ちながら米の蛋白質含有率を下げるにはどうすれば良いか? 以前の北海道産米の品質は決して良いものではありませんでした。北海道立農試の宮森は、新潟や北陸の米と北海道の米を比較しました。その結果、稲体のケイ酸含有率に大きな違いがあることに気づきました。窒素吸収量に応じた光合成産物(澱粉)の量を増やし、効率良く籾に転流させれば、生産量を維持しながら蛋白含有率を下げるのが可能であるとの考えに至りました。そのためにはケイ酸の施用が不可欠であり、莖葉中のケイ酸/窒素比を高めることの重要性を明らかにしました。ケイ酸/窒素比を高めるためには、ケイ酸追肥が有効であることも示されています。では何故ケイ酸は追肥が有効なのか? 水稻が吸収する全ケイ酸量の6割は幼穂形成期以降に吸収します。出穂後でも全吸収量の3割を吸収しています。栄養生長期に大半を吸収する三要素とは異なり、生育後半のケイ酸の重要性は古くから示されているところです(奥田ら1961)。出穂30日前ころのケイ酸追肥、この時期の追肥作業は労力的にも大変な時期ですが、是非取り組みたい技術の一つではないでしょうか。

水稻の主なケイ酸供給源
 土壤から 約50%
 灌漑水から 約15%
 有機物+施肥 約35%

灌漑水中ケイ酸濃度は低下
 年々有機物施肥量は減少
 稲わらケイ酸の利用率は6%程度
 (住田・大山1991、Ma & Takahashi1991)

表 水田のケイ酸供給に関わる状況変化(藤井2002抜粋)

年次	土壌の可給態ケイ酸 mg/100g	灌漑水中ケイ酸濃度 mg/L	灌漑水によるケイ酸供給量 kg/10a	稲茎葉中ケイ酸含有率 %
①S54~56年	45.5	19.7	28	13
②H4~6年	16.8	9.8	14	11
②/①比	37	50	50	85

• ストレスのない条件ではケイ酸の効果が不明瞭
 • 少量が少ないと効果を発揮しない

ケイ酸の効果が過小評価されている

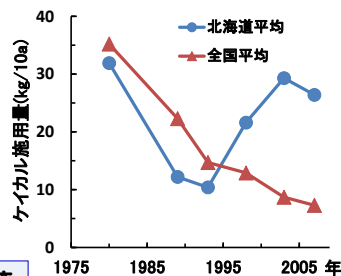


図 ケイカル施用量の年次推移(農水省農業経営調査報告)

地球の地殻(岩石や土)を形成する元素の6割はケイ素です。無尽蔵にあると言えます。岩石等に含まれるケイ酸は溶け出し、灌漑水として水田に供給されます。水稻の主なケイ酸供給源は、土壌から約50%、灌漑水から約15%程度であると言われています。イネわらなどの有機物も重要な給源となります。ところが、岩石(土壌)に含まれるケイ酸は、ごく一部しか溶け出さず、イネわらに含まれるケイ酸の利用率は6%程度、水田への有機物施肥量も減少しているなか、ケイ酸質肥料の施用は不可欠です(住田・太田1991、Ma & Takahashi1991)。

地球にはケイ酸が無尽蔵に存在します。しかし、残念なことに岩石から溶け出すケイ酸量はわずかです。その上、ダム建設が灌漑水中ケイ酸濃度を低下させているとも言われています。左の表を見ると、10数年の間に土壌の可給態ケイ酸量、灌漑水によるケイ酸供給量ともに半減しています。ケイカル施用量の統計を見ても減少の一途です。生産者のケイ酸離れの要因の一つとして、後藤(2011)は、二つの要因を指摘し、ケイ酸の効果を過小評価しているのではないかと述べています。

- ① ストレスの少ない条件ではケイ酸の効果が見えにくいこと
- ② 少ない施用量では効果が不鮮明なこと

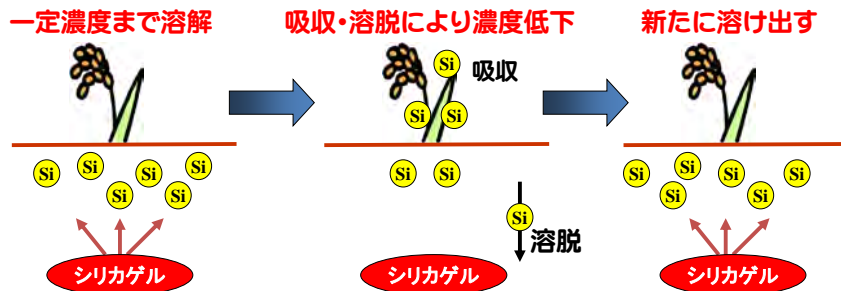
さらに、鉱さいケイ酸の中には効果が不安定な物があった(Katoら1997)こともケイ酸離れを招いたのではないのでしょうか。そこで施用効果が安定したシリカゲルが開発されました。

一般の鉱さいケイ酸質肥料 (Kato:1996、尾和:2002)

- 土壌溶液に対する溶解度
10~25mg/L (ppm)
- pHとCa濃度が上昇
→ケイ酸溶解抑制と土壌吸着
→土壌溶液中ケイ酸濃度は
低レベルで推移

シリカゲル肥料 (藤井ら:1999、2002)

- 土壌溶液に対する溶解度
140~150mg/L (ppm)
- 土壌のpHが変化しない
- 吸収、溶脱でケイ酸濃度が低下
→速やかに(2日程度)回復
- 植物吸収応答型ケイ酸(藤井)



四国4県の共同研究の結果では、土壌中の水溶性ケイ酸と水稻吸収量が比例するという結果が得られました(高橋1981)。

土壌に施用されたケイ酸質肥料に含まれるケイ酸の溶解については、Kato (1996)、尾和(2002)、藤井ら(1999、2002)によって詳細に検討され、シリカゲルの溶解性が高く、施用効果も高いことが明らかになりました。

一般の鉱さいケイ酸質肥料の土壌溶液(水)に対する溶解度は10~25ppmですが、シリカゲルは140~150ppmです。鉱さいケイ酸質肥料は、施用後の時間経過と共にカルシウムの溶解が進み、土壌溶液のpHが上昇していきます。もともと、鉱さいケイ酸質肥料はほとんど水には溶けませんが、カルシウム濃度とpHの上昇によりケイ酸の溶解抑制と土壌吸着が促進され、土壌溶液中ケイ酸濃度は低いまま経過します。

一方シリカゲルは、鉱さいケイ酸質肥料よりも水に対する溶解度は高く、pH上昇もありません。それでも溶解度は、高々140~150ppmです。シリカゲルを施用した水田では、ケイ酸が水稻に吸収されたり、溶脱することによって土壌溶液中ケイ酸濃度が低下すると、速やかに(2日程度)元のレベルまで回復していきます。これにより、土壌溶液中のケイ酸は常に140ppm程度の濃度が維持されます。このことが、シリカゲルの高い施用効果が得られる理由と考えられています。ケイ酸溶解を繰り返すシリカゲルの性質を、水稻ケイ酸研究の第一人者である山形大の藤井教授は、「植物吸収応答型ケイ酸」と表しています。

- 水稻成熟期の茎葉中ケイ酸含有率目標値11%(山形農試)
- 茎葉ケイ酸含有率を1%高めるために必要なケイ酸資材量(元肥)は、水溶性ケイ酸*換算で15kg/10a(山形農試)
- 熔りんはCd吸収抑制効果もある(滋賀県、農環研、他)

表 成熟期水稻の茎葉中ケイ酸含有率1%上昇に必要な肥料の量(山形県農試)

けい酸質肥料の種類	水溶性ケイ酸(%)*	施用量(kg/10a)
熔成りん肥	15	100
鉱さいケイ酸質肥料(ケイカル)	6	250
軽量発泡コンクリート(ALC)	15	100
熔成けい酸りん肥	20	75
けい酸加里肥料	8	200

*水溶性ケイ酸:25℃水-弱酸性陽イオン交換樹脂96時間抽出法(加藤の方法)

熔成りん肥(熔りん)は、優れたりん酸質肥料ですが、熔りんには20%程度のケイ酸を含んでいます。含まれるケイ酸は有効度の高い、よく効くケイ酸であることが明らかになっています。

山形県農試の研究によれば、成熟期の水稻茎葉中ケイ酸濃度は11%以上であることが望ましいとされています。茎葉中ケイ酸濃度を1%上げるために必要なけい酸質肥料の量は、水溶性ケイ酸換算で15kg/10aが必要であるとされています。

弱酸性陽イオン交換樹脂という特殊な樹脂を添加した水中で溶出するケイ酸を測定することで、けい酸質肥料の効果を正確に評価することができます。この方法を用いて、成熟期水稻の茎葉中ケイ酸濃度を1%高めるために、水田(元肥)に施用すべきけい酸質肥料の量が試算されています。これによると、熔りん100kg/10aの施用で成熟期水稻の茎葉中ケイ酸濃度を1%高めることができます。一方で、ケイカルなら250kg/10aが必要であることが分かります。シリカゲルは、この方法では評価できませんが、熔りんの有効性がよく分かります。また、熔りんにはカドミウムの吸収抑制効果も認められています(滋賀県、農環研ほか)。熔りんには米の食味に重要なマグネシウム(苦土)も含んでいます。マグネシウムはケイ酸の吸収促進作用もあり、ケイ酸とマグネシウムの同時施用は有効な方法だと考えられます。

SHK スーパーケイサンの主材はシリカゲル 6

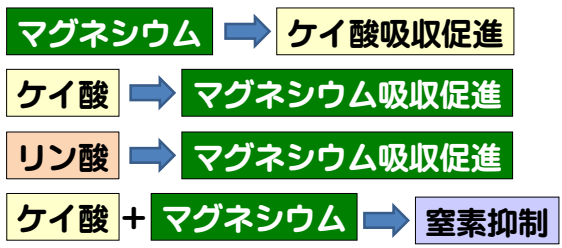
農水省登録 輸第9205号

保証成分				参考成分	
く溶性リン酸	水溶性カリ	可溶性ケイ酸	く溶性苦土	アルカリ分	pH
8%	2%	40%	3%	13%	6.5~7.0

15kgポリ袋入り

シリカゲル由来：34%
熔リン由来：6%

元肥：3~6袋/10a
追肥：2~4袋/10a



収量・品質確保

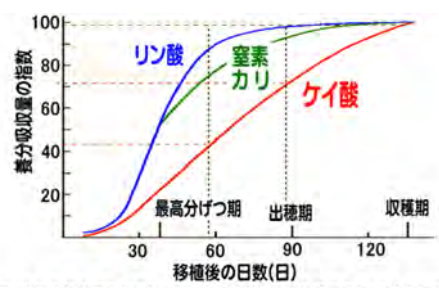
スーパーケイサンは、施用効果の高いシリカゲルと熔リンを組み合わせ、少量のかりを加え粒状にした肥料です。スーパーケイサンには可溶性ケイ酸を40%以上含んでおります。そのうち34%以上はシリカゲル由来のケイ酸です。6%は熔リン由来のケイ酸となっています。シリカゲルは最も有効度の高いケイ酸質肥料です。熔リンも、鉱さいケイ酸質肥料などに比較して有効度の高いケイ酸質肥料です。スーパーケイサンは、可溶性ケイ酸以外に、8%のく溶性リン酸、3%のく溶性苦土を含有しています。これらはいずれも熔リンに由来しており、緩効的で吸収利用率の高いリン酸と苦土です。アルカリ分（熔リン由来）を13%程度含有しますが、pHは中性です。連用による土壌のアルカリ化を起しません。ケイ酸とマグネシウムは、相互に吸収を促進します。また、リン酸はマグネシウムの吸収を促進します。有効度の高いケイ酸は、少量で良く効き、光合成促進、登熟向上などにより、米の収量と品質を確保します。苦土は、光合成を行う葉緑素の成分であるとともに、米の食味に関係します。ケイ酸+マグネシウムは窒素の吸収を抑制します。リン酸+カリも窒素の吸収を抑制します。ケイ酸の効果と相まって病害虫に強い稲体を作ります。スーパーケイサンは、イネに大変重要なケイ酸を効率良く効かせることのできる優れた肥料です。ただし、粉がやや多くなっています。シリカゲルを加えた肥料の造粒は非常に難しく、弊社独自のノウハウで何とか粒にしているというのが現状です。取り扱いには難がありますが、何とぞご容赦下さい。

SHK 少しで良く効く・スーパーケイサン追肥 7

表 施用時期を変えた時のコシヒカリに対するスーパーケイサンの施用効果

処理区	精玄米重 kg/10a	整粒歩合 %	玄米蛋白 %	稈長 (cm)
対照区(ケイ酸無施用)	546 (100)	90.7	7.4	73.1
基肥 ケイカル 80kg	572 (105)	89.7	7.4	72.7
Sケイ酸 40kg	581 (106)	90.9	7.6	73.6
追肥 ケイカル 40kg 出穂-20日	574 (105)	89.9	7.2	73.2
Sケイ酸 20kg 出穂-30日	610 (112) ★	86.9	7.8	70.8 ★
Sケイ酸 20kg 出穂-20日	584 (107)	91.9	7.0 ★	69.1 ★

2007年度委託試験(山形大農・藤井教授) 試験場所:山形県鶴岡市現地水田



出穂20~30日前施用
高温障害にも有効な追肥

表 ケイ酸吸収時期と水稲(農林22号)収量(奥田ら:1961)

処理時期	精粗重 (g/ポット)	稈歩合 (%)	千粒重 (g)	ケイ酸含有率 (%)	
前期 後期				地上部	根部
-Si -Si	5.25	55	20.4	0.05	0.02
+Si -Si	6.64	67	20.4	2.16	0.45
-Si +Si	10.30	78	20.2	6.88	3.38
+Si +Si	10.83	76	20.2	10.41	3.42

図 水稲の養分吸収量推移(馬・高橋)収穫時の養分吸収量を100とした指数

ケイ酸吸収量は、出穂の前後に最も多くなり、生育の初期から後期までイネの一生を通じて吸収されます。ケイ酸欠如の影響は、生育の前半より後半に大きな影響が現れます。そこで、出穂前にケイ酸を追施用することで有効にケイ酸を効かすことが出来ます。この時期のケイ酸追肥は、これから登熟期を向かえる水稲にとって、高温障害の軽減にも効果的な施用法です。また、一般に追肥施用は、元肥施用に比べて少ない量で同等あるいはそれ以上の効果が得られ、経済的にも有利な施用法です。弊社でもケイ酸追肥に着目して、スーパーケイサンの最も効果的な施用時期を探るため、山形大学農学部藤井教授に依頼し、スーパーケイサンの施用時期を変えた試験を行っていただきました。スーパーケイサンは、元肥の場合40kg/10a、追肥の場合は20kg/10aとしました。対照にはケイカルを施用し、元肥80kg/10a、追肥40kg/10aとしました。いずれの肥料もケイ酸無施用区に比べて高い収量が得られましたが、ケイカルに比べてスーパーケイサンの方が少ない量で良く効くことが実証されるとともに、出穂30日前の施用が特に効果的でした。一方で玄米タンパク質は、スーパーケイサンの出穂20前の施用で低下すること、スーパーケイサンの追肥施用で稈長が低くなることを明らかにすることができました。総合して、スーパーケイサンを出穂30~20日前に施用することで、より少ない施用量で、より高い効果が得られることが分かりました。この時期は追肥時期と重なるため、作業的にはいささかキツイとは思いますが、是非取り入れていただきたい技術の一つです。

表 水稲(コシヒカリ)に対するスーパーケイサン60kg/10aの施用効果

処理区	分けつ期(6/8)		最高分けつ期(7/8)		成熟期(9/5)			有効茎	
	草丈 cm	茎数 本/m ²	草丈 cm	茎数 本/m ²	稈長 cm	穂長 cm	穂数 本/m ²	歩合 %	倒伏程度
慣行区	29.0	315	75.9	613	94	18.4	402	65.6	微
展示区	29.5	340	74.8	693	94	18.5	444	63.9	微

処理区	わら重		精玄米重		収量構成要素				
	kg/10a	kg/10a	重量 kg/10a	同左比	穂数 本/m ²	一穂粒数 粒/穂	籾数 粒/m ²	登熟歩合 %	千粒重 g
慣行区	593	690	550	100	402	73.8	29,700	85.5	21.4
展示区	620	728	579	105	444	77.3	34,300	90.0	21.4

処理区	倒伏程度	起立程度
慣行区	2.1	0.48
展示区	1.8	0.55

※ 慣行区:ケイカル80kg/10a(元肥) 展示区:スーパーケイサン60kg/10a(元肥)
 ※ 慣行区、展示区とも田植期5月7日、出穂期7月31日、成熟期9月12日
 ※ 倒伏程度:0(無)~6(甚) 起立程度:倒伏指数の逆数

いささか古いデータで恐縮ですが、平成17年度石川県展示圃での試験結果をご紹介します。スーパーケイサン60kg/10aを元肥に施用し、対照にはケイカル80kgを元肥施用しました。

やや過剰分けつで有効茎歩合は低くなっていますが、展示区(スーパーケイサン区)のm²当たり穂数はコシヒカリの標準的な値でした。さらに、展示区のm²当たり籾数はかなり多いにもかかわらず、慣行区より穂数が多く、登熟歩合が高くなったことにより、高い増収効果を現したと考えられます。倒伏は軽微であったため、数字的には両試験区の差は小さくなっておりませんが、現地圃場の観察では数値以上に展示区の倒伏は軽かったように思われました。

試験の概要	試験担当部署 : 石川県羽咋農林総合事務所
	試験場所 : 石川県羽咋郡安達志水町免田、太田和雄
	供試作物 : 水稲(品種;コシヒカリ)
	試験の規模 : 1区10a 1区1連制
	土壌 : 半湿田 砂壤土 作土深13cm
	耕種概要 : 田植期 平成17年5月7日
	栽植密度 29.2×18.8cm (18.2株/m ²)
	施肥 : N-P-K=6.6-6.0-4.3kg/10a (元肥一発)
	土作り資材 : 展示区 スーパーケイサン 60kg/10a
	慣行区 ケイカル 80kg/10a

- ・イチゴ・キュウリ・ブドウなどのうどん粉病、キュウリの根腐病などの軽減
- ・イチゴ果実の軟化防止、イチゴ茎葉の硬化(前川ら2001)
- ・20~30kg/10a表層施用で、ユリの茎を固くする(生産者談)
 その他キクやカーネーションなどでもケイ酸の効果が認められている(生産者談)
- ・キュウリ、オオムギなどのマンガン過剰害の軽減

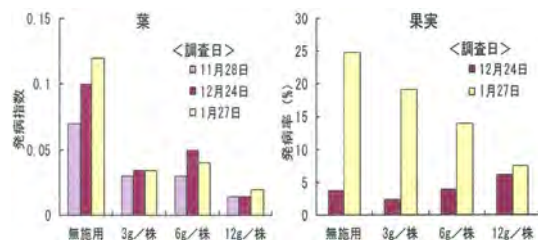


図 シリカゲルによるヤシ殻培地を用いた養液栽培イチゴのうどん粉病抑制効果(島根農試2002)
 ※シリカゲルは培地表面に施用した

シリカゲルの有用性は水稲に限ったことではありません。石灰に比べてケイ酸吸収量の多い、いわゆるケイ酸植物は水稲などのイネ科植物をはじめ、カヤツリグサ科の一部、蕨類植物と一部のシダ植物に限られています。ウリ科は中間的な植物となっています。農業作物に限れば、水稲とウリ科植物以外はほとんどケイ酸を吸収しません。ところが、厳密なケイ酸欠如栽培を行うと、キュウリやトマトでもうどん粉病の激発や生長点の異常をきたすことが報告されています(三宅・高橋1976、高橋ら1980、三宅・高橋1982)。キュウリ、メロン、カボチャ、イチゴ、ブドウ、バラなど多くの作物でうどん粉病を軽減する効果が多数の研究者によって報告されています。前川(2001)は、イチゴの軟果防止、茎葉の硬化に有効であることを報告しています。

キュウリやオオムギなど多くの作物でマンガン過剰症の軽減に有効であることも報告されています(Rogallaら2002、奥田ら1962、Horiguchiら1987、ほか多数)。

北海道のユリ生産者は、スーパーケイサンを表土に20~30kg/10a施用しておくと、ユリの茎が明らかに丈夫になると言っていました。キクやカーネーション生産者も同様のことを指摘しています。

スーパーケイサンは水稲以外にも使っていたらいい肥料ですが、ジャガイモには使わないで下さい。ケイ酸を施用すると土壌のアルミニウムを不活性化し、ジャガイモの大敵であるそうか病を助長する可能性があります。

おわり

本日はありがとうございました。
ケイ酸の重要性は今さら申し上げるまでもござい
ませんが、弊社が自信を持ってお薦めするスーパーケイ
サンです。ご検討いただければ幸いです。



文責：清和肥料工業株式会社
研究室 真野良平
TEL：073-445-1861

水稲におけるケイ酸栄養は、古くて新しい課題です。水稲に対するケイ酸の必要性は、古くから認識されており、ケイ酸施用によっていもち病が軽減されることは、すでに1927年に川島によって報告されています。ケイ酸は、水稲のみならず多くの作物で何らかの生理活性があることは、ほぼ間違いのないものと思われます。しかし、今のところ植物の代謝に関与している確証が得られていないため、アーノンとスタウト(1939)の必須元素基準を満たさず、植物の必須元素としては認められていません。日本ではイネに対する農業上の必須元素としての地位を与えられ、1955年には世界ではじめてケイ酸が肥料成分として認められました。その後イネ作りの一環としてケイ酸質肥料の施用が行われてきました。ところが、いつしか生産者の間で鉢さいケイ酸の施用効果が疑問視されるようになり、社会的状況の変化とも相まってケイ酸質肥料の施用量が減少、さらには土壌のケイ酸供給能も低下してきました。研究者にもケイ酸研究はあまり重要視されなくなった時代もあったように思います。幸いにも1990年ころから新しい知見が得られ、ケイ酸栄養の重要性が再認識されるようになりました。その後の20年間にケイ酸の生理的研究は大きな進歩を見せています。ご紹介したシリカゲルをはじめとする新しい有効度の高いケイ酸質肥料も開発されております。本提案が、ケイ酸栄養を見直す一助になれば幸いです。

スーパーケイサンご提案資料v4.11
(2019年5月20日改定)

Memo