

灌漑水中のケイ酸が水稻のケイ酸吸収および 生育, 収量に及ぼす影響

望月 証*・青山喜典**

要 約

灌漑水のケイ酸濃度の違いが, 水稻の生育, 収量やケイ酸吸収量に及ぼす影響について, 兵庫県立農林水産技術総合センター内の土壌を用いてポット試験により検討し, 次の結果を得た.

- 1 ケイ酸ナトリウムを用いて灌漑水のケイ酸濃度を 0 ppm, 5 ppm, 10ppm, 20ppm, 40ppm と変えて栽培した結果, 有効茎歩合は, 20ppm区まではケイ酸濃度の上昇に比例して高くなり, 40ppm区では20ppm区より低下した.
- 2 収量は灌漑水のケイ酸濃度が20ppm区までは灌漑水のケイ酸濃度が上昇するに従って増加し, 40ppm区ではやや減少した. 灌漑水によるケイ酸の施用により1穂粒数が増加し, 10ppm区, 20ppm区では登熟歩合が向上した.
- 3 灌漑水のケイ酸濃度が増加しても稲のケイ酸含有率は20ppm区までは増加しなかったが, 稲1株当たりのケイ酸含量は灌漑水中のケイ酸濃度に比例して増加した. 稲のケイ酸吸収量に占める灌漑水のケイ酸の寄与率は最高で23%であった. 灌漑水のケイ酸の利用率は50%~88%とどの区も高かった.

Silicate in Irrigation Water Affected the Intake, Growth and Yield of Paddy Rice

Akashi MOCHIZUKI and Yoshinori AOYAMA

Summary

We cultivated paddy rice with irrigation water with various levels of silicate: 0, 5, 10, 20 and 40 ppm, in pots. Then, the effect of silicate on the growth and yield of paddy rice was investigated. In addition, the silicate content in rice plants was analyzed.

- (1) The percentage of bearing tillers increased in proportion to the silicic acid concentration of irrigation water from 0 ppm to 20 ppm; it decreased in the 40 ppm plot compared with that in the 20 ppm plot.
- (2) A similar tendency was observed for the yield of rice. In all plots, the number of grains per ear was greater than in the 0 ppm plot. In the 10 ppm and 20 ppm plots, the percentage of ripened grains was greater than in the 0 ppm plot.
- (3) The higher the silicate concentration in irrigation water, the more silicate the rice plants contained, but their silicate concentrations did not differ significantly. The contribution of irrigation water to silicate content of rice plants was 23% at maximum. The absorption rate of the silicate from irrigation water ranged from 50% to 88%.

キーワード：ケイ酸, 水稻, 灌漑水

2012年9月28日受理

* 兵庫県立農林水産技術総合センター農業技術センター

** 兵庫県立農林水産技術総合センター淡路農業技術センター

緒 言

水稲では、ケイ酸は有用元素として位置づけられている。その効果は、受光体勢の改善等による光合成能の向上や水ストレス軽減、耐病性の向上などが報告されており^{5,14)}、栽培現場では収量増加や品質向上に対する効果が知られている^{8,15)}。筆者らも堆肥を連用した水田において、ケイ酸資材の施用が収量低下を軽減することを報告しており¹⁰⁾、ケイ酸質肥料は現在も土づくりの基礎となっている⁴⁾。水稲のケイ酸吸収量は10a当たり50kgを超え、土壌や灌漑水から補給される。地域別にみた兵庫県内の灌漑水のケイ酸平均濃度は9.5ppm～22.5ppmと差が大きく²⁾、高いものは40ppmを超える場合も見受けられる。そのため、灌漑水のケイ酸濃度が、水稲のケイ酸濃度及び吸収量に大きく影響する可能性がある。

今回、灌漑水から供給されるケイ酸が水稲の生育、収量等へ及ぼす影響を明らかにするため、当センター所内ほ場（兵庫県加西市）のケイ酸供給力の少ない灰色低地土を用いて、ケイ酸濃度を変えた灌漑水で水稲を栽培し、その影響を検討した。

材料および方法

水稲は、1/2000aワグネルポットを用いて、兵庫県立農林水産技術総合センター（兵庫県加西市）内のガラス室で栽培した。供試土壌は1987年のセンター移転時に兵庫県明石市の土壌を客土した所内ほ場の細粒灰色低地土を用いた。供試品種は「ヒノヒカリ」とし、2006年5月26日播種、6月30日にポット当たり3株を移植、中干しは7月29日～30日、収穫は10月17日に行った。出穂期は8月27日であった。試験区は、灌漑水のケイ酸濃度レベルにより、0ppm、5ppm、10ppm、20ppm、40ppmの5区とし、各区2連制とした。灌漑水のケイ酸濃度の調製は、過去の水耕栽培結果と比較するためにケイ酸ナトリウム（水ガラス）（CP、片山化学工業製）を用いて、イオン交換水に溶かし、ICP発光分光分析法によりケイ

酸濃度を確認した。ワグネルポットは降雨等の影響のないガラス室におくこととした。ポットの水管理は、同一管理とし、中干し期間以外は、灌漑水を補給して常時湛水状態を継続した。施肥は、基肥に単肥として硫酸、過石、塩加を供試し、窒素、リン酸、カリ各成分をポット当たり1g施用し、追肥は無施用とした。

水稲の生育調査は分けつ期と幼穂形成期、穂揃い期、収穫期に実施した。収穫期には各ポットの稲体を採取し、穂とワラに分け、穂は更に枝梗とモミに分けた。収量と収量構成要素を調査後の玄米、モミガラ、ワラおよび枝梗を合わせて1検体として、ケイ酸を重量法により測定し、全窒素をNCアナライザー（SUMIGRAPHI NC-220F）を用いて乾式燃焼法により測定した。土壌の可給態ケイ酸は湛水保温静置法¹²⁾で測定し、土壌溶液はポーラスカップ（φ2mm×10cm）を用いて、表面から2cmより深い位置から採取し、ICP発光分光分析法によりケイ酸濃度を測定した。

結 果

1 生育期間中の灌漑水から供給されるケイ酸量

ケイ酸の積算量を図1に示した。灌漑水の供給量は80.0L～86.7Lで各区の差は少なく、ケイ酸濃度の異なる各灌漑水からポットへ供給される各区のケイ酸の積算供給量は、5ppm区が0.42g、10ppm区が0.85g、20ppm区が1.72g、40ppm区が3.37gとなる。ケイ酸の供給量は、水稲の灌漑水の吸収量に合わせて、水稲の生育が旺盛になる7月後半から増加し、10月に入るとやや減少する傾向があった。

2 水稲の生育

水稲の生育を表1に示した。0ppm区は分けつが初期にやや増えにくかったものの最終の穂数は他区と遜色なかった。40ppm区は生育後半に草丈・稈長が長かったが、茎数・穂数は他区より少ない傾向を示した。稈長・穂

表1 各試験区の水稲の生育

試験区	7月19日 ^{*1}		8月10日 ^{*1}		9月1日 ^{*1}		10月16日 ^{*1}			有効茎 歩合 %
	草丈 cm	茎数 本/株	草丈 cm	茎数 本/株	草丈 cm	茎数 本/株	稈長 cm	穂長 cm	穂数 本/株	
0ppm	48.0a	9.8a	72.2a	22.3a	89.2a	21.3a	66.6a	17.6a	20.0a	89.6
5ppm	47.4a	12.2ab	75.6a	21.5a	91.2a	21.2a	67.5ab	18.1a	20.3a	94.6
10ppm	47.7a	11.8ab	72.4a	20.8a	93.1ab	21.5a	67.9ab	18.5a	20.3a	97.6
20ppm	46.4a	13.2b	71.6a	20.2a	90.5a	20.2a	67.7ab	18.4a	20.5a	101.7
40ppm	47.9a	12.8b	74.3a	19.8a	97.0ab	19.5a	71.1b	17.3a	18.7a	94.1

各項目列ごとに英文字が異なる場合は有意差あり(Tukeyの方法による $\alpha=0.05$)

*¹7月19日：分けつ期、8月10日：幼穂形成期、9月1日：穂揃い期、10月16日：収穫期

長・穂数とも0~20ppmの範囲では大きな差はみられなかった。有効茎歩合は、0~20ppmの範囲では、灌漑水のケイ酸濃度の上昇に伴い増加する傾向を示した。

3 水稻の収量および収量構成要素

ポット当たりの水稻収量を表2に示した。全重・精粗重とも濃度の高い区が多かった。精玄米重は0ppm区を100%として、0ppm区と比較すると、灌漑水のケイ酸

濃度が20ppm区では109%となり、濃度が高くなるほど精玄米重も大きくなった。40ppm区では107%と20ppm区よりやや低くなった。収量構成要素では一穂粒数及び登熟歩合が共にケイ酸施用により増加傾向を示し、前者では40ppm区が、後者では20ppm区が最も高い値を示した。千粒重は各区の差は少なく一定の傾向は認められなかった。

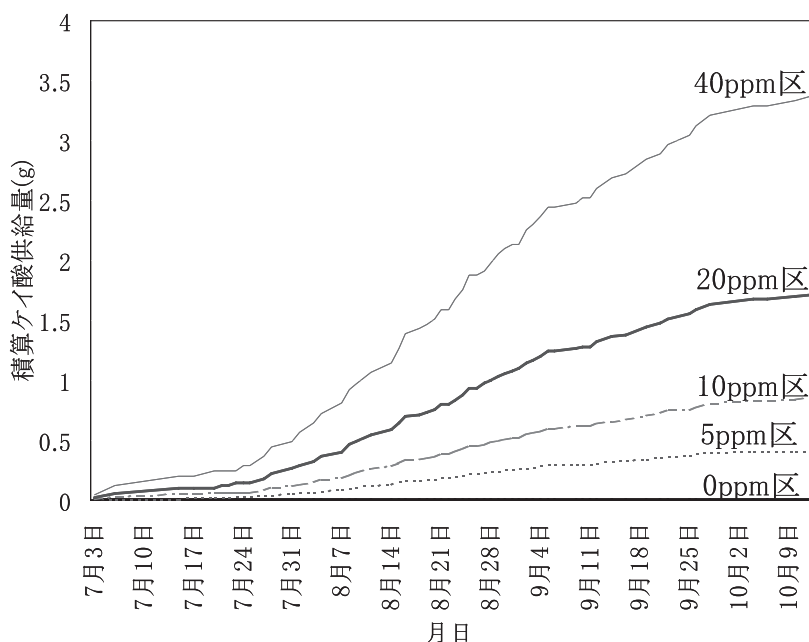


図1 灌漑水によるケイ酸の積算供給量

4 水稻のケイ酸含有率とケイ酸含量

水稻のケイ酸含有率とケイ酸含量を表3に示した。0, 5, 10, 20ppm区の中では、茎葉及び全体のケイ酸含有率に顕著な差は見られなかったが、40ppm区のみケイ酸含有率が高い傾向を示した。1株中のケイ酸含量は灌漑水のケイ酸濃度の上昇に伴い増加する傾向があり、40ppm区では特に多くなった。0ppm区との差し引き法により、各試験区の灌漑水からの吸収量を求めたところ、5ppm区では1株当たり0.10gであり、40ppm区では0.93gと約9倍の吸収量となった。稲のケイ酸含量全体に占める灌漑水から吸収したケイ酸の割合は5ppm区では3.0%で

表2 灌漑水のケイ酸濃度が水稻収量に及ぼす影響

試験区	全重 g/pot	ワラ重 (B) g/pot	精モミ 重(A) g/pot	(A)/(B) %	くず 米重 g/pot	精玄 米重 g/pot	0ppm区 対比 %	収量構成要素		
								一穂 粒数	登熟歩 合(%)	千粒重 g
0ppm	222	127	91	72	1.5	69	100	64.0	88.4	20.5
5ppm	232	135	95	71	1.4	72	105	65.0	88.1	20.7
10ppm	222	122	97	80	1.1	75	108	71.5	89.1	20.3
20ppm	238	136	99	73	1.9	75	109	67.9	90.2	20.6
40ppm	240	133	99	74	2.1	74	107	72.3	87.7	20.5

表3 灌漑水中のケイ酸濃度の違いが水稻のケイ酸含量等に及ぼす影響

試験区	ケイ酸含有率※1(%)		ケイ酸含 量※1(g/株)	灌漑水からのケイ酸 吸収量(g/株)※2	ケイ酸含有量における 灌漑水の割合(%)※2	灌漑水中ケイ酸の 利用率(%)※2
	茎葉	全体				
0ppm	7.6	5.4	3.14	-	-	-
5ppm	7.3	5.2	3.24	0.10	3.0	71.4
10ppm	7.4	5.1	3.28	0.14	4.3	49.4
20ppm	7.6	5.3	3.45	0.31	9.0	54.1
40ppm	9.3	6.3	4.07	0.93	22.9	82.8

※1 茎葉、玄米、モミガラ、枝梗のケイ酸濃度と各重量から算出

※2 試験区0ppmとの差による

あるが、灌漑水のケイ酸濃度が高くなるにつれて増加し、40ppm区では22.9%となった。これらの結果と図1に示した灌漑水から供給されたケイ酸の総量から、利用率を求めると10ppm区が49.4%と最も低く、40ppm区が82.8%と最も高かった。

5 水稲の窒素濃度

図2に示すとおり、各試験区の水稲全体の窒素濃度は0.67~0.73%と差は少なく、0 ppm区で0.70%とほぼ中間値となり、一定の傾向はみられなかった。玄米の窒素濃度についても一定の傾向はみられなかった。茎葉については0 ppm区で0.55%、5 ppm区で0.57%、20ppm区で0.52%、40ppm区で0.53%と灌漑水のケイ酸濃度が上昇すれば、茎葉の窒素濃度がやや減少する傾向があるが、差は少なかった。

6 灌漑水のケイ酸ナトリウムが土壌に及ぼす影響

ケイ酸濃度の調製に用いたケイ酸ナトリウムがアルカリ性であるため、作付後土壌のpH、EC、可給態ケイ酸に及ぼす影響を上層（0~10cm）、下層（10~20cm）に分けて調査した（表4）。作付後土壌の可給態ケイ酸はどの試験区も作付前土壌と比較して大きく減少したが、各試験区の差は見られなかった。pHは作付前の差は少なく40ppm区においてはやや上昇した。ECは上層の土壌で灌漑水のケイ酸濃度が高い区において上昇の傾向がみられるが、全体としては低い結果となった。7月26日に採取した土壌溶液中のケイ酸濃度は灌漑水のケイ酸濃度に関わらず、2.5~4.4ppmと低く、10月13日採取では0.4~1.5ppmとさらに低下した。

考 察

1 灌漑水中のケイ酸が水稲の生育、収量に及ぼす影響

水稲の草丈は、灌漑水のケイ酸濃度が40ppmの場合に最も高くなったが、他区は一定の傾向はみられず、草丈や茎数に対する影響は明白ではなかった。有効茎歩合は20ppmまでは灌漑水のケイ酸濃度が高くなるほど増加し、40ppmでも0 ppmより4.5%高かった。イネにおいては、ケイ酸が光合成能の向上や葉身の老化抑制への効果を示すとされ³⁾、このことが、灌漑水のケイ酸濃度が高い場合においても、有効茎歩合の増加につながったと考えられる。収量については、灌漑水のケイ酸濃度が20ppmまでは精玄米重が増加し、40ppmでは20ppmよりやや減少した。この傾向は有効茎歩合同様であり、幼穂形成期以降のケイ酸の効果が表れていると考えられる。特に、生殖生長期におけるケイ酸の効果として、登熟歩合の向上や一穂粒数の増加が知られているが¹⁵⁾、今回の結果と一致する。このことから、収量増加のためには、生育後半のケイ酸が重要であることが示唆された。

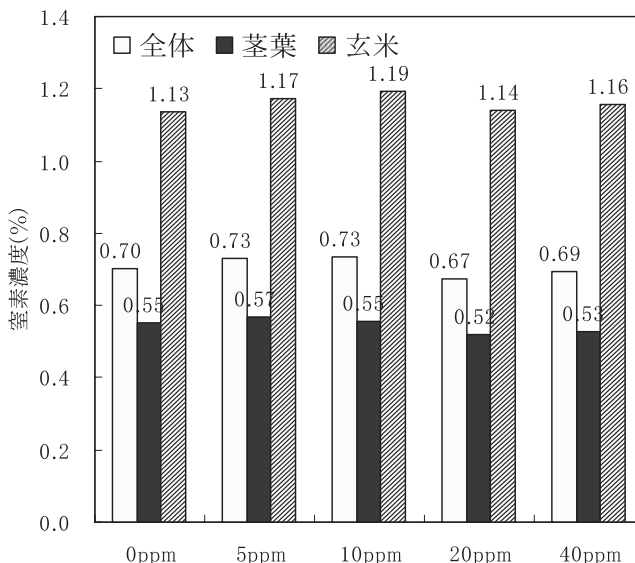


図2 灌漑水中のケイ酸が水稲の窒素濃度に及ぼす影響

表4 作付前後土壌の可給態ケイ酸、pH、ECおよび土壌溶液のケイ酸濃度

試験区	可給態ケイ酸※ (mg/100g)		pH(1:2.5)		EC(dS/m)		土壌溶液の ケイ酸濃度(ppm)	
	上層	下層	上層	下層	上層	下層	7月26日	
							10月13日	
作付前	16.8		5.1		0.05			
0ppm	12.9	11.3	4.8	5.2	0.04	0.04	3.1	0.8
作 5ppm	11.9	10.5	4.9	5.2	0.05	0.04	4.4	0.4
付 10ppm	11.9	10.7	5.0	5.2	0.05	0.04	2.5	1.2
後 20ppm	12.6	10.8	5.0	5.3	0.06	0.04	3.1	0.8
40ppm	12.7	10.6	5.3	5.4	0.06	0.04	3.4	1.5

上層：表層から0~10cmの土壌、下層：10~20cmの土壌

※湛水保温静置法

また、高収量が得られた20ppmという灌漑水のケイ酸濃度は地域によっては特別高い濃度ではない²⁾。20ppmという濃度の灌漑水によっても増収効果が得られることはケイ酸供給力が低い土壌での今後の対策に役立つ結果と考えられる。

2 水稲における灌漑水中のケイ酸の影響

水稲のケイ酸含有率は、表3が示すとおり、40ppm区は高かったが、それ以外の区は0ppm区と同等かそれ以下となった。しかし、灌漑水のケイ酸濃度が高くなるに従って稲のケイ酸含量（ケイ酸吸収量）は高くなった。一方、最も収量が高かった20ppm区でケイ酸吸収量における灌漑水の割合が8.8%であり、ケイ酸濃度0~20ppmの灌漑水が供給するケイ酸量は、水稲のケイ酸含有率を高くするほどの量ではないと考えられた。なお、水稲のケイ酸吸収量における灌漑水の割合は20%程度という報告がある¹⁵⁾が、40ppm区であっても稲が吸収したケイ酸のうち灌漑水からの割合が23%という結果から、今回のようにケイ酸供給力が低い土壌であっても、土壌由来のケイ酸が水稲の主な供給源であることが示唆された。

灌漑水のケイ酸の利用率は49.4~82.1%と幅広くなり、これまでの報告¹⁵⁾より高くなったが、ポット試験で溶脱がないことや水の供給源が灌漑水のみであることから、50%以上の利用率になったものと考えられる。一般的に、水稲における鉍さいケイ酸質肥料の利用率は30%程度であること^{1,7)}を考慮すると、灌漑水のケイ酸は水稲に吸収されやすいと考えられた。なお、ケイ酸の形態については、pHが9.0より低い一般の灌漑水では分子状のケイ酸が主である¹⁵⁾と考えられる。今回の灌漑水は供給時には分子状のケイ酸とイオン化したケイ酸が混在しているが、土壌pHは低いため、分子状が主な形態となり、その形態で速やかに水稲に吸収されていると考えられた。

次に、灌漑水のケイ酸濃度が高い場合は、低い場合と比べてどの程度のケイ酸質肥料の量に相当するかは次のとおりとなる。灌漑水が10a当たり1,500tとすると、灌漑水のケイ酸濃度が5ppmでは7.5kg/10a、20ppmでは30kg/10aのケイ酸が供給されることとなる。利用率が50%とすると灌漑水から5ppmでは3.25kg/10a、20ppmでは15kg/10aのケイ酸を吸収することとなる。鉍さいケイ酸質肥料のケイ酸成分が30%、水稲の利用率を30%とすると、5ppmの灌漑水と比べて20ppmの灌漑水を利用するだけで、10a当たり鉍さいケイ酸質肥料を約130kg施用する場合に匹敵すると考えられる。以上のような試算結果から、灌漑水のケイ酸は水稲の吸収するケイ酸全

体に対する割合は低いですが、外部から投入するケイ酸資材としては重要な役割を果たしていると考えられる。

3 灌漑水のケイ酸濃度が水稲の窒素濃度におよぼす影響

水稲葉身のケイ酸含有率と窒素含有率の間には負の相関関係がみられる¹⁰⁾が、本試験では水稲茎葉のケイ酸濃度は40ppmが高いが、40ppmでも水稲の窒素濃度への影響はみられなかった。また、同様にケイ酸資材施用により玄米タンパクが下がる報告もある⁶⁾が、今回玄米の窒素濃度に灌漑水の影響はみられなかった。よって、本試験における灌漑水からのケイ酸の供給量では水稲のケイ酸濃度の変化も少なく、水稲や玄米の窒素濃度に影響はほとんどないと考えられ、灌漑水中のケイ酸による収量増加等への影響はケイ酸が窒素濃度へ影響したことによる間接的なものではないことが示唆された。

4 土壌および土壌溶液中のケイ酸

作付後土壌の可給態ケイ酸は上層、下層とも灌漑水の影響が明確ではなかった。作付前と比較すると作付後は大きく減少しており、土壌の可給態ケイ酸は水稲に吸収され大きく減少したと考えられた。一方灌漑水中のケイ酸塩の影響はpH、ECへの影響が少なかったことから、ナトリウムやpHが生育、収量に及ぼした影響は小さいと考えられた。

土壌溶液のケイ酸濃度は、どの区も差がほとんどみられなかった。7月26日では灌漑水のケイ酸濃度が40ppmでも、土壌溶液のケイ酸濃度が3.4ppmと低くなっていることから、水稲に速やかに吸収されると考えられた。7月26日より10月13日の方が土壌溶液のケイ酸濃度がさらに低くなったことから、稲体は7月26日以降さらにケイ酸吸収が旺盛になり、収穫期においてもケイ酸の吸収が持続すると考えられた。森らは、水稲は幼穂形成期以降にケイ酸の吸収速度が増加するとしているが、報告では極早生品種での幼穂形成期である7月中旬より前の7月上旬の有効分けつ期頃からケイ酸吸収速度の増加が始まっている⁹⁾。このことから、中生の品種を用いた本試験において、7月26日は有効分けつ期後半であるためケイ酸吸収速度が高まっており、報告にあるように⁹⁾、土壌のケイ酸供給力が低い場合は、その後の幼穂形成期以降に水稲の吸収するケイ酸が不足すると考えられた。そのため、灌漑水のケイ酸濃度の違いは、幼穂形成期以降のケイ酸吸収に影響すると考えられた。特に本試験では、土壌溶液のケイ酸濃度が一様に低いことから、供試した土壌のケイ酸供給力が少なく、灌漑水と合わせても、水稲の幼穂形成期以降のケイ酸吸収速度に追いつい

ていないことが示唆される。このことは、20ppmまでは水稲のケイ酸濃度が上昇せずに、1穂粒数の増加や登熟歩合が向上した状況を説明していると考えられる。

5 今後の灌漑水の利用方法

本報告では、ケイ酸の供給力の低い土壌では、ケイ酸濃度が20ppmの灌漑水によっても増収効果があることが分かった。また、灌漑水のケイ酸は、土壌のケイ酸供給力に比べれば供給力は低い、利用率が高いことや生育後期のケイ酸が必要な時期においても安定して水稲に供給が可能であるという利点が示された。なお、本試験条件のように40ppm程度の灌漑水では悪影響は見られないことが判明している。

今後、現場で利用するためには、灌漑水のケイ酸は地域により差があり²⁾、水田土壌とともに地域の地質と関係している¹⁵⁾ため、水田土壌と灌漑水のケイ酸濃度の関係を調査する必要がある。その上で、土壌や灌漑水からのケイ酸供給力の少ない地域では、土づくりとしてケイ酸質肥料を施用すると共に、ケイ酸質肥料の流し込み施肥など、総合的な施肥対策を検討する必要がある。

引用文献

- (1) 安藤淳平・尾和尚人・浅野径幸（1088）：鉍さいの溶解性と肥効に及ぼすアルミナの影響：土肥誌59（1）：27-32
- (2) 青山喜典・望月 証・松山 稔・津高寿和（2008）：兵庫県内水田土壌のケイ酸含量と資材施用量の変化：兵庫農技総七研報（農業）56：37-38
- (3) 藤井弘志・森静香（2005）：ケイ酸施用による収量・食味向上技術：農業技術体系作物編2（追録第27号）：第2-②巻 技676の22-23
- (4) 兵庫県（2003）：環境負荷軽減に配慮した各種作物の施肥基準（兵庫県）：4-5
- (5) 前川和正・渡辺和彦・相野公孝・岩本 豊（2001）：各種ケイ酸資材施用による育苗期のイネいもち病の発病抑制：土肥誌72（1）：56-62
- (6) 松村 信・郡司掛則昭（2001）：水稲の養分吸収および玄米品質に及ぼすケイ酸質資材の影響：九州農業研究63：60
- (7) 松村 信・村上 章・郡司掛則昭（2006）：異なる地域における水稲のケイ酸吸収特性とケイカル施用効果：続報 ケイ酸供給力の異なる土壌を用いた水稲栽培におけるケイカルならびに灌漑水由来のケイ酸利用率：日本土壤肥料学会講演要旨集52：139
- (8) 宮森康雄（1996）：低タンパク米生産におけるケイ酸の役割とその診断指標：土肥誌67（6）：696-700
- (9) 森 静香・藤井弘志・安藤 豊（2008）：水稲の時期別ケイ酸吸収速度に及ぼす土壌のケイ酸供給量の影響：79（4）：387-391
- (10) 望月 証・青山喜典・津高寿和（2006）：気象要因が堆肥連用水田の水稲収量に及ぼす影響：兵庫農技総七研報（農業）54：1-8
- (11) 住田弘一（1992）：水稲のケイ酸吸収に対する窒素栄養の影響：土肥誌63（6）：633-638
- (12) 住田弘一（2001）：土壌機能モニタリング調査のための土壌、水質及び植物体分析法（財団法人 日本土壤協会）：81-84
- (13) 住田弘一・尾和尚人・北田敬宇・藤井弘志・前川和正・神頭武嗣・渡辺和彦・加藤直人（2001）：2001年高知大会シンポジウムの概要「ケイ酸と作物生産」：土肥誌72（6）：839-844
- (14) 高橋英一（2003）：ケイ酸の吸収と生理作用：農業技術体系土壌・肥料編2（追録第14号）：作物栄養Ⅲ 77-83
- (15) 高橋英一（2007）：作物にとってケイ酸とは何か（農文協）：21-25, 47-48, 72-86, 122-135