

## イネへのケイ酸施用が有用である理由

間藤 徹\*・村田伸治\*・高橋英一\*

キーワード イネ, ケイ酸, 光合成, 水ストレス

## 1. はじめに

水耕法を用いたイネのケイ酸欠除栽培試験から, ケイ酸施用がイネの生育に有用であることが明らかになり, その生理作用のメカニズムについて, さまざまな仮説が提案されてきている<sup>1,2)</sup>が, ケイ酸の作用点を明らかにした報告はいまだにない. われわれは, イネの塩化ナトリウムによる過剰害が, ケイ酸を添加することで軽減されること<sup>3)</sup>, 硫酸ナトリウム過剰による水ストレス障害の軽減にケイ酸が有効であること<sup>2)</sup>から, ケイ酸はイネ葉の水環境を良好に維持することで, 間接的に光合成に正の影響を持っているのではないかという作業仮説を立て, それを実証するために実験を開始した.

## 2. 材料と方法

## 1) イネの栽培と分析

インド稲, IR 30を用いた. 塩選(NaCl 1%)した種子50粒をガーゼ上に播種した. 種子にペーパータオルをかぶせ, これは2日後に取り除いた. ガーゼはポリエチレンビーズにより保持した. 5日目に1/2濃度の培養液を与え, 7日後に大きさの揃った24個体を選び, 2個体ずつ12組とし, これらを6組ずつ10l容ポリエチレン容器に移し, 第2週目からケイ酸添加, 欠除処理を行った. 培養液の交換は週3回行い, 播種後5週間まで栽培し, 2, 3, 4, 5週目に新鮮重を測定した.

培養液組成は以下のとおりである.  $\text{NH}_4\text{-N}$  20,  $\text{NO}_3\text{-N}$  20, P 10, K 40, Ca 40, Mg 40, Fe 1.5, Mn 0.5, B 0.2, Zn 0.1, Mo 0.05, Cu 0.01 (各 ppm), pH 6.0. ケイ酸は20% ケイ酸カリウム水溶液 (ナカライテスク, 京都市)を10倍に希釈し, アンバーライト IR 120H<sup>+</sup> 型樹脂カラム (3×30cm) でカリウムを除き, 培養液終濃度が $\text{SiO}_2$ として100 ppmになるように添加した. 水は銅釜蒸留水を用いた. 栽培実験を行ううちに, ケイ酸添加区では鉄欠乏が著しいことが判明したので, ケイ酸添

加区の鉄濃度は5 ppmとした.

栽培は人工気象器 (高山製作所製, FWH-280) を用いて行い, 気温 30°C, 相対湿度 40, 90%, 最大光量子密度  $450 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$  (平均  $280\sim 300 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ ), 昼夜12時間ずつとした.

## 2) 生長解析, 光合成測定, 水ポテンシャル

1週ごとに新鮮重を測定し, その変化から下記の式により相対生長速度を計算した.

$$\text{RGR} = \ln W_2 - \ln W_1$$

ただし  $W_2$  は  $W_1$  測定から1週間後の新鮮重.

気相での光合成速度は, 携帯式光合成蒸散測定装置 SPB-H2 型 (島津製作所製) を用い, 人工気象器内で測定した. 供試した葉は播種後4週目の最上位の完全展開葉で, その先端10~15cmで測定した. 明期開始後4時間の蒸散量を測定しこれを昼間蒸散量とし, 暗期開始後4時間の同一部位の蒸散量を夜間蒸散量とした.

5週目の新鮮重測定後, 同一部位の葉身を用い, ISHIIらの方法<sup>4)</sup>と酸素電極 (ハンザテック社製) で液相, 光量子密度  $1500 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$  での酸素発生速度を比較した.

葉の水ポテンシャルは小葉田・高見の方法<sup>5)</sup>で測定した.

## 3. 結 果

## 1) 栽培試験

人工気象器内の相対湿度を40%として栽培実験を行ったところ, 第5週目の新鮮重はケイ酸添加区が欠除区の約2倍であった (結果示さず). このときの完全展開葉の昼間の水ポテンシャルはケイ酸添加植物で  $-7.5 \pm 1.4$  bar, ケイ酸欠除植物で  $-10.1 \pm 1.3$  bar で, ケイ酸欠除植物が, より強い水ストレスを受けていることが示された.

相対湿度90%で栽培すると相対湿度40%のときに比べケイ酸欠除, 添加区ともに生育量は増加し, ケイ酸による生育の促進の割合は小さくなった. しかしケイ酸による有意な差は認められ, ケイ酸施用は生育に有用であった (第1表). しかしこのときには, 葉の水ポテンシ

\* 京都大学農学部植物栄養学研究室 (606 京都市左京区北白川追分町)

1990年5月7日受理

日本土壌肥科学雑誌 第62巻 第3号 p. 248~251 (1991)

第1表 ケイ酸添加，欠除栽培したイネの相対生長速度の経時的変化

測定期間	処 理	
	ケイ酸欠除 (g/g/week)	ケイ酸添加
第3週	2.02 ± 0.116	2.15 ± 0.0727
第4週	1.07 ± 0.0729	1.16 ± 0.0600
第5週	0.653 ± 0.0628	0.807 ± 0.0481

それぞれ6連の平均と標準偏差。第4週からは1%の危険率で有意差あり。

ルにはケイ酸の有無での有意差は認められなかった(結果示さず)。

## 2) 光合成活性

相対湿度90%で栽培したときには40%のときに比べて葉の水ストレス状態が緩和され、ケイ酸の有用効果がみられなくなことを期待したが、結果は前述のとおり、相対湿度90%のときにも生育量に有意差が認められた。しかし葉の水ポテンシャルには有意差はみられなかった。このときの光合成速度を比較したところ(第2表)、光合成速度はケイ酸添加植物が有意に高かった。一方、酸素電極によるイネ葉片の光、重炭酸イオンに依存した単位葉面積当たりの酸素発生速度は、ケイ酸添加、欠除によって差はなかった(結果示さず)。

蒸散速度はケイ酸欠除区のほうが高かった(第2表)。炭酸ガスの気孔コンダクタンスも葉内外の水蒸気分圧の差から算出するため、蒸散速度の高いケイ酸欠除植物のほうがより高い気孔コンダクタンスを示した。しかし気孔が開孔していると考えられる夜間の蒸散速度もケイ酸欠除植物のほうが高かった。そこで、蒸散速度から明所での葉内の水蒸気分圧と暗所での水蒸気分圧を計算によって求め、その差から気孔のみに由来すると考えられる“真の”気孔コンダクタンスを計算したところ、ケイ酸添加植物のほうが高い気孔コンダクタンスを示した。

## 4. 考 察

### 1) 本試験の問題点

当初、ガラス温室に設置した160ℓ容透明アクリル箱

にイネを密閉しこれに乾燥空気を送り込んで低い相対湿度下での栽培を試みたが、葉身からの蒸散によってアクリル箱内の相対湿度はただちに上昇し乾燥状態を維持することは不可能であった。一方、人工気象器では最大照度が40,000 lx、平均30,000 lx程度と照度不足が問題となった。第2表にあげた光合成速度は10 mg CO<sub>2</sub>・dm<sup>-2</sup>・h<sup>-1</sup>以下で、屋外の光合成速度よりかなり低い。しかし試験区、対照区で光条件が対等であり、さらに、環境条件の再現性が高いことから、ここでは人工気象器を用いた。第1表に示したように、生育の進行に伴う相対生長速度の低下が著しく、この規模での5週以降の栽培は困難であった。その理由として相互シャヘイによる群落内の照度不足が考えられた。

栽培は10ℓ容器で水耕を行った。現在広く行われている水耕栽培では、養分を土壌でみられるように低濃度大容量に供給するのではなく、高濃度小容量で与えるのが通例となっている。本試験で与えたケイ酸の濃度は100 ppm(SiO<sub>2</sub>)であるが、第2章でも述べたように、ケイ酸添加区では、1.5 ppmの鉄では鉄欠乏が生じた。それに伴い生育量も低下し、ケイ酸添加区の播種後3週間の生長量はケイ酸欠除区の生長量に劣った(80%)。一方、鉄濃度を5 ppmとすると、ケイ酸添加区の鉄欠乏は発生しなくなったが、ケイ酸欠除区では下位葉の褐色斑点が急増し、鉄過剰障害を受けていると推察された。これらの予備試験の結果から、本試験では鉄投与量をケイ酸添加区で5 ppm、欠除区で1.5 ppmとした。本実験はケイ酸の有用効果を期待するものであったが、ケイ酸の有無によって鉄供給の至適濃度範囲が変わってしまうためケイ酸の有無以外の条件を揃えることができなかった。つまりケイ酸欠除によってイネが鉄過剰障害を受けやすくなるため、ケイ酸による生育促進がケイ酸そのものの作用より大きく現われていた可能性も考えられるが、ここではケイ酸の有無で少なくとも葉緑素濃度には有意差がなかったため鉄供給量の違いの影響は大きくないと判断した。

多くの報告<sup>1)</sup>があるように、ケイ酸添加栽培により、イネ地上部の鉄、マンガン含有率は減少し根の含有率が

第2表 ケイ酸添加，欠除で4週間栽培したイネの光合成活性

処 理	光合成速度 (mg CO <sub>2</sub> /dm <sup>2</sup> /h)	昼間蒸散速度 (mg H <sub>2</sub> O/dm <sup>2</sup> /h)	夜間蒸散速度 (mg H <sub>2</sub> O/dm <sup>2</sup> /h)	みかけの気孔 コンダクタンス (cm/s)	真の気孔 コンダクタンス (cm/s)
ケイ酸欠除	5.86 ± 0.97	6640 ± 360	2590 ± 346	3.09 ± 0.89	0.970 ± 0.18
ケイ酸添加	8.23 ± 1.35	5770 ± 970	1440 ± 390	2.03 ± 0.95	1.32 ± 0.24

測定は3回の栽培試験について行い、そのうち光合成速度の差の最も大きかったものをここに示した。

供試した植物は各処理区ともに6個体で1個体から2枚合計12枚の葉について測定値の平均と標準偏差を示した。

気孔コンダクタンスはCO<sub>2</sub>の値。いずれも1%の危険率で有意差あり。

上昇する。これは、ケイ酸を与えることで根の酸化力が高まり、鉄、マンガンの根表面への酸化沈着が促進された結果と考えられている<sup>1)</sup>。流動水耕法などによって、ケイ酸、鉄、マンガンの培養液濃度を下げて栽培した場合にも同じような結果になるのかどうか、今後の検討課題である。

## 2) ケイ酸の有用効果

相対湿度 90% で栽培したイネでもケイ酸の有用性が認められ、それは光合成速度の促進を介して現われていると考えられた。光合成を律速するのは、①気孔抵抗(気孔コンダクタンス)、②光エネルギーの化学エネルギーへの転換速度(明反応)、③炭酸ガスのリブローズ 2 リン酸への取り込み速度(暗反応)と考えられる。葉片を用いた水相での重炭酸イオンと光に依存した酸素発生速度に差がなかったことから、ケイ酸が明反応や暗反応に正の効果をもつ可能性は除外できた。またこの結果は、葉に蓄積されたケイ酸ゲルが集光作用をもつことで光の利用効率を高めて有用性を発揮するという“天窓仮説”<sup>2)</sup>を否定するものである。第 2 表に示したように、真の気孔コンダクタンスに有意差がみられたことから、ケイ酸を含有した葉では気孔開度が高くなることで光合成が促進されていることが示唆された。

ケイ酸欠除イネでは、ケイ酸添加イネに比べて蒸散量が増加することが高橋<sup>1)</sup>、吉田<sup>2)</sup>によって報告されている。吉田<sup>2)</sup>によると、イネ葉身のケイ酸はいわゆるプラントオパールではなくシリカゲルのような形態で、このケイ酸が、クチクラ-シリカ二重層を形成して水の蒸散を抑えるという。夜間には気孔は閉じていると考えられるので、夜間の蒸散量は気孔を経由していないものと考えられる。一般にこれはクチクラ蒸散とされているが本実験では測定器の仕様から、葉の両面からの蒸散量を測定しているため、厳密にはクチクラ蒸散とはいえない。相対湿度 90% で生育させたときにもケイ酸が気孔以外からの蒸散を抑えていることが示唆されたが(第 2 表)、葉の水ポテンシャルには有意な差は認められず、ケイ酸欠除栽培したイネ葉身が水ストレス状態にあることをプレッシャーチェンパー法では明らかにできなかった。より精度の高い方法で再検討する必要がある。しかし気孔開度はケイ酸添加イネで有意に高かったことから同程度の葉身水ポテンシャルを維持するのにケイ酸欠除イネではケイ酸添加イネに比べて気孔開度を低く抑えておかなくてはならないと推察された。

これらの結果からケイ酸が含有された葉は気孔以外からの蒸散が少ないので、ケイ酸添加、欠除葉の水ポテンシャルが同じであってもケイ酸添加イネ葉では気孔開度

をケイ酸欠除イネ葉より高く保つことが可能となり、その結果光合成が促進されるものと推察した。ただし光合成速度の差は気孔コンダクタンスの差から推定されるものより大きいので、その他の因子が存在する可能性もある。オオムギやトウモロコシでは同じイネ科でもケイ酸の施用効果がイネほど顕著ではない理由として、イネはクチクラ層の発達が貧弱なためにケイ酸の表皮への沈着が不十分な場合はクチクラ蒸散による葉の水分の損失を抑えられない<sup>2)</sup>ことが考えられる。イネでクチクラ層が発達せずケイ酸の沈着がそれを補う機構になっているのは、イネが沼沢植物起源の栽培植物であることと関係があるかもしれない。人工気象器内で照度も低く相対湿度を 90% に維持していてもケイ酸の有無によって光合成速度に有意差がみられたことは、圃場では葉身ケイ酸含有率の多寡によって、真夏の昼間の光合成速度が影響をうける<sup>6)</sup>であろうことが推察される。

## 5. 要 約

イネをケイ酸添加、欠除条件で栽培すると、ケイ酸添加植物の生育が欠除植物の生育を上回った。その理由を知るために、それぞれのイネの光合成速度を、赤外線炭酸ガス計による無傷葉の気相での炭酸ガス固定速度と、酸素電極による葉片の液相での酸素発生速度と比較したところ、葉片の酸素発生速度には差はなかったが、無傷葉の炭酸ガス固定速度はケイ酸添加栽培したものが欠除栽培したものを上回っていた。またケイ酸添加栽培したイネ葉の CO<sub>2</sub> の気孔コンダクタンスは欠除植物のそれより大きかった。これらの結果から、ケイ酸は葉の水分状態を良好に保ち、その欠除は葉を水ストレス状態とすることで気孔コンダクタンスの低下、光合成速度の低下を引き起こすと推察した。

謝 辞 本研究にあたり IR 30 の種子をご恵与くださり有益な助言をいただいた京都大学農学部作物学研究室藤井道彦氏(現、静岡大学)、長谷川利弘氏(現、九州東海大学)に深く感謝いたします。生長解析に関してアドバイスをいただいた河地利彦博士(京都大学農学部)に感謝します。

## 文 献

- 1) 高橋英一：ケイ酸植物と石灰植物，農文協，東京(1987)
- 2) 吉田昌一：水稻体内におけるケイ酸の存在様式と生理的意義に関する研究，農技研報 B, 15, 1~57 (1965)
- 3) MATOH, T., KAIRUSMEE, P. and TAKAHASHI, E.: Salt-induced damage to rice plants and alleviation effect of silicate. *Soil Sci. Plant Nutr.*, 32, 295~304 (1986)
- 4) ISHII, R., YAMAGISHI, T. and MURATA, Y.: On a

method for measuring photosynthesis and respiration of leaf slices with an oxygen electrode. *Jpn. J. Crop Sci.*, **46**, 53~57 (1977)

- 5) 小葉田亨・高見晋一：プレッシャーチェンバーによるイネ葉身の水ポテンシャル測定方法の検討，日作紀，**53**，

290~298 (1984)

- 6) 石原 邦・齊藤邦行：湛水状態の水田に生育する水稻の個葉光合成速度の日変化に影響する要因について，同上，**56**，8~17 (1987)

### Effect of Silicate Application on Photosynthesis of Rice Plants

Toru MATOH, Shinji MURATA and Eiichi TAKAHASHI

(Plant Nutr. Lab., Fac. Agric., Kyoto Univ.)

Photosynthesis and evapotranspiration rate of rice plants raised with and without silicate in a growth chamber was compared. Photosynthesis rate determined using an infra-red CO<sub>2</sub> analyzer was higher in the silicate-supplied plants. Apparent stomatal conductance was higher in the silicate-deprived plants; however, greater evapotranspiration through cuticle-layer contributed to the exaggerated stomatal conductance, and actual stomatal conductance was calculated to be greater in the silicate-supplied plants. As the photosynthesis rate determined in terms of oxygen evolution by the leaf discs was nearly the same between the treatments, the greater stomata conductance contributed to the higher photosynthesis rate in the silicate-supplied rice plants. Consequently, it was concluded that silicate accumulation in the leaves prevented water-loss through cuticle-layer, then provided favorable water-relations for photosynthesis.

*Key words* cuticle evapotranspiration, photosynthesis, rice plants, silicate

(Jpn. J. Soil Sci. Plant Nutr., **62**, 248-251, 1991)

## 書 評

### 土 の 世 界

大地からのメッセージ

「土の世界」編集グループ 編

A 5 判, 160 pp., 1,854 円

朝倉書店 (東京), 1990 年

本書は，土に対する理解を深めるために，日本各地の若手研究者により編集・刊行されたもので，執筆に先立ち，全国の小学生から大学生まで約 5000 人を対象にアンケート調査を行い，それに答える形で編集されている。

前半のⅠ～Ⅲ編は，土の生成，構成，働きについての説明で，後半のⅣ～Ⅶ編は，土が生物の生命と活動を支える仕組みを見直し，地球上で現在起っている問題について，具体的にかつ幅広くとらえ，考えるということ で書かれている。各編は 4～9 章から成り，1 章が 5 ページ前後と比較的短くまとめられている。また，「トピックス」，「Coffee Break」といった読み物を織り交ぜ，

身近な例があげられており，土への関心を高めるための工夫が感じられる。

本書の特徴としては，1 章ごとに執筆者が異なり，47 名という多数の著者による共著の形をとっていることである。しかし，共著書にありがちな，同じ内容の繰り返しや，同一図表の重複した引用もなく，注意深い編集となっている。

本書は，多くの人が土に関心を持ち，理解を深めることを願って刊行されたものではあるが，各章ごとの各著者による工夫と熱意に満ちた文章は，「さらりと読める」とは言いがたく，アンケート調査に基づくとはいうものの，一般には，まだまだ専門的と受けとめられてしまうのではないと思われる。しかし，各章が 5 ページ前後にまとめられているので，知りたいところを順序に関係なく読めることから，土壌学を初めて学ぶ人にとって，嬉しい一冊となるのではないだろうか。

(日本大学農獣医学部 新町文絵)