

不耕起栽培継続田における土壌のケイ酸供給量 及び水稲のケイ酸含有率

山本 章吾・久山 弘巳*・柳井 雅美**

The Quantity of Silica Supplied from Soil and Contained in Rice
Plants Grown in a Paddy Field Utilized for Repeated Non-Tillage Direct Sowing Culture

Shogo Yamamoto, Hiromi Kuyama* and Masayoshi Yanai**

緒 言

岡山県の不耕起乾田直播栽培（以下、不耕起栽培）は、水稲の省力、低コスト技術として開発され、2000年には県南部を中心に約300haで行われている。不耕起栽培は、幅3cmの播種溝以外は耕起しないので、収穫時に地表に還元された稲わらは土中に混和されずに作土表面に堆積する。そのため、不耕起栽培を継続すると有機物のほか窒素、リン酸及び加里などの養分が作土表層に偏在することを長期不耕起栽培圃場研究グループ（1994）は指摘している。また、二見・渋谷（1990）は、不耕起栽培の水稲の根は地表面に多く分布し、根の活力も成熟期近くまで高いと報告している。

ケイ酸は、水稲に吸収される成分のうち、最も吸収量が多く、葉身の直立化による受光体勢の改善、耐倒伏性の向上など健全に生育するための重要な成分であると奥田・高橋（1961、1962）、東江ら（1992）は指摘している。また、今泉・吉田（1958）はケイ酸吸収量の約7割が土壌に由来するとしており、十分なケイ酸吸収量を確保するためには、水田のケイ酸供給力を高く維持することが重要である。

しかし、不耕起栽培田における土壌の可給態ケイ酸含有量及び水稲のケイ酸含有率などについて検討した例は少なく、特に収穫時の稲わらを地表面に還元した不耕起田における調査例はない。また、土壌のケイ酸供給力を

知る方法として、従来法のpH4酢酸緩衝液抽出法は抽出条件が強すぎて水稲のケイ酸吸収を反映していない場合があることが指摘されており、水稲のケイ酸吸収量と相関が高いとされる湛水保温静置法（高橋・野中、1986）を用いた新たな調査が必要である。

そこで、不耕起栽培と耕起移植栽培の継続栽培田における土壌の可給態ケイ酸含有量及び水稲のケイ酸含有率を調査比較するとともに、ケイ酸資材の施用や耕うん処理による水稲のケイ酸含有率の改善効果を検討したので報告する。

方 法

1. 耕種概要

岡山県農業総合センター農業試験場の同一圃場（中粗粒灰色低地土、土性CL）内に不耕起栽培区と耕起移植栽培区を設け、さらに不耕起栽培区には稲わら還元区と稲わら除去区を設けた。不耕起栽培は1993年に開始し、2001年まで9年間継続栽培を行った。収穫時の稲わらは、稲わら除去区を除いて全量圃場に還元した。

試験は1区0.2a（4×5m）、2反復で行い、水稲の品種はアケボノを用いた。不耕起栽培は、毎年5月中旬に不耕起直播機（条間30cm）を使って浸漬初をa当たり0.5kg播種した。耕起移植栽培は4月中旬と6月上旬にロータリーによる耕うん・碎土を行い、代かき後の6月20日頃に中苗を移植した。両区とも入水は6月20日、落水は9月25日、

*現岡山県農業総合センター総合調整部技術普及課、**元岡山県立農業試験場

収穫は10月25日頃であった。

不耕起栽培の施肥は140日溶出型の被覆尿素LP140、過リン酸石灰、塩化加里を用い、播種時に地表面施用した。耕起移植栽培は、140日溶出型で速効性窒素20%を含んだ被覆複合肥料LPE80を用いて代かき時に施肥した。

窒素、リン酸及び加里の施肥量は、両栽培ともa当たり0.8kgであった。

2. 栽培方法及び稲わらの有無が土壤中のケイ酸含有量に及ぼす影響

不耕起栽培及び耕起移植栽培継続田において、水稻栽培後の土壌を採取し、可給態ケイ酸含有量を調査した。また、水稻成熟期の稲わら及び籾のケイ酸含有率を測定し、それぞれの乾物収量を乗じてケイ酸吸収量を求めた。

また、不耕起栽培における稲わら還元の影響を知るため、稲わら還元区及び稲わら除去区について上記と同様の調査を行った。

3. ケイ酸供給力の改善試験

(1) ケイ酸資材の施用効果

稲わらを全量還元する不耕起栽培において、ケイ酸資材を地表面に散布し、土壌の可給態ケイ酸含有量及び水稻のケイ酸吸収量に及ぼす効果を調査した。

試験区は、ケイ酸資材を6作目まで毎作a当たり20kg施用する区（以下、連用区）と、不耕起栽培1作目（1993年）の作付け前にa当たり60kg施用する区（以下、単用区）、資材無施用区を設けた。供試したケイ酸資材はケイカル、ミネラルGであり、水稻播種の1か月前に施用した。供試したケイ酸資材の含有成分は表1に示した。

表1 供試したケイ酸資材の含有成分 (%)

| 資材名 | ケイ酸 | 苦土 | 石灰 | マンガン | リン酸 | 加里 |
|-------|-----|----|----|------|-----|-----|
| ケイカル | 31 | 5 | 45 | — | — | — |
| ミネラルG | 20 | 4 | 38 | 5 | 2 | 0.6 |

(2) 耕起栽培への転換の効果

不耕起栽培を1993～1997年まで5作継続した圃場で、6作目を耕起直播栽培あるいは耕起移植栽培に転換し、不耕起栽培及び耕起移植栽培の継続田と土壌の可給態ケイ酸含有量及び稲わらのケイ酸含有率を比較した。耕うん作業は、6作目作付け前の3月中旬と5月上旬に行った。

4. 土壌及び植物体のケイ酸含有量

土壌は、水稻の成熟期の収穫前に、深さ0～3cm（作土表層）、3～13cm（作土下層）、13～26cm（下層）に分けて採取し、風乾後に篩別（2mm）して分析試料とした。土壌の可給態ケイ酸含有量は、土壌、水質及び植物体分析法（2001）の湛水保温静置法により抽出したケイ酸を、

モリブデンブルー発色液の吸光度測定により求めた。水稻の稲わら及び籾の乾物量は、成熟期の地上部を1.5m（5条）×2m採取して求めた。植物体のケイ酸含有率は、乾物試料をるつぼ中で灰化し、ケイ酸分離した灰化物を重量法で測定した。

結果

1. 不耕起栽培における土壌の可給態ケイ酸

不耕起栽培の稲わら還元区、稲わら除去区及び耕起移植栽培区における土壌の可給態ケイ酸含有量を図1に示した。耕起移植栽培区の可給態ケイ酸含有量は、作土上層、作土下層ともに11～17mg/100g程度で推移し、年次変動が比較的少なかった。

一方、不耕起栽培の稲わら還元区は、3作目頃から作土表層の可給態ケイ酸が増加する傾向がみられ、6作目から急増して7作目には30mg/100gに達した。作土下層

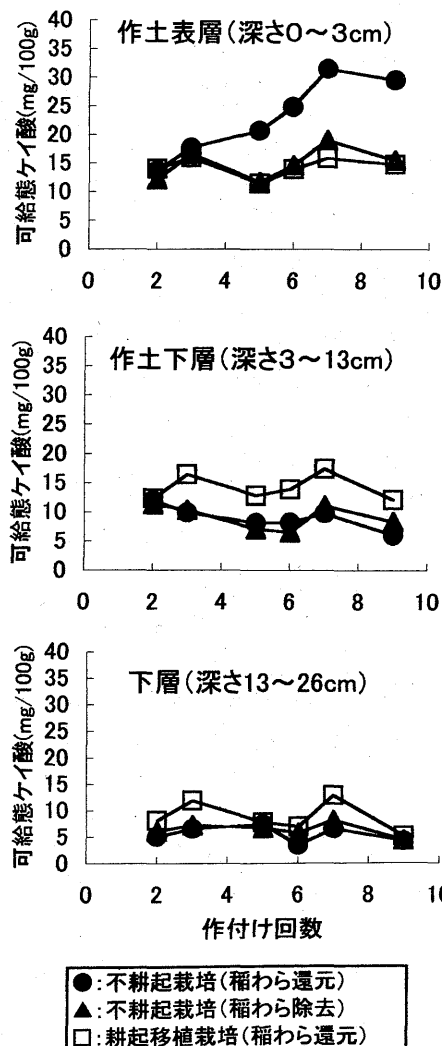


図1 栽培法の違いが土壌中の可給態ケイ酸含有量に及ぼす影響

の可給態ケイ酸は、耕起移植栽培区に比べて少なく、しかも徐々に減少する傾向が認められた。下層土の可給態ケイ酸は不耕起栽培、耕起栽培ともに作土層に比べて少なく、栽培法による差も少なかった。

稲わら除去区の可給態ケイ酸は、作土表層では11~19mg/100gと稲わら還元区に比べて少なく、作土下層では稲わら還元区と同様に漸減傾向を示した。

深さ0~13cmの作土層全体に含まれる可給態ケイ酸含有量を表2に示した。不耕起栽培の稲わら還元区はa当たり1.43~1.93kg (平均1.59kg)、稲わら除去区は1.06~1.68kg (平均1.36kg) であり、いずれも耕起移植栽培区の1.62~2.22kg (平均1.85kg) に比べて少なかった。

2. 不耕起栽培における水稻のケイ酸含有率

各試験区における稲わら及び籾のケイ酸含有率を図2に示した。籾のケイ酸含有率は2~3%で推移し、栽培法による差が少なかった。一方、稲わらのケイ酸含有率は、

表2 不耕起栽培の作土^{a)}に含まれる可給態ケイ酸含有量^{b)} (kg/a)

| 試験区 | 不耕起栽培の継続年数 | 不耕起栽培の継続年数 | | | | | | | 平均(指数) |
|----------|------------|------------|------|------|------|------|------|-----------|--------|
| | | 2 | 3 | 5 | 6 | 7 | 9 | | |
| 不耕起栽培 還元 | 稲わら | 1.61 | 1.52 | 1.43 | 1.56 | 1.93 | 1.50 | 1.59(86) | |
| 不耕起栽培 除去 | 稲わら | 1.50 | 1.54 | 1.06 | 1.09 | 1.68 | 1.31 | 1.36(74) | |
| 耕起栽培 還元 | 稲わら | 1.65 | 2.12 | 1.62 | 1.81 | 2.22 | 1.65 | 1.85(100) | |

a) 深さ0~13cm

b) 各層位(深さ0~3cm、1~13cm)ごとの可給態ケイ酸含有量を測定し、土壌の仮比重を1.0と仮定して算出した

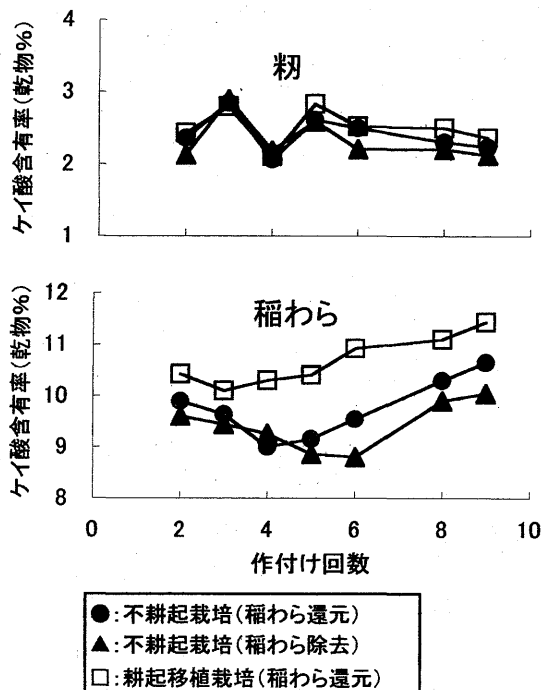


図2 栽培法の違いが稲わら、籾のケイ酸含有率に及ぼす影響

不耕起栽培の稲わら還元区は9.0~10.7% (平均9.7%)、稲わら除去区は8.8~10.0% (平均9.2%) であり、耕起移植栽培区の10.1~11.6% (平均10.7%) に比べて低く推移し、不耕起栽培の開始以降徐々に低下する傾向であった。しかし、稲わら還元区は、作付け開始から5作目までは稲わら除去区と同程度であったが、6作目以降は漸増して耕起移植栽培に近づく傾向を示した。圃場に還元される稲わら由来のケイ酸利用率を求めたところ、不耕起栽培3作目には4.7%であったが、4から6作目には0.9~2.8%に低下し、9作目には再び8.1%に増加した(表3)。

稲わら及び籾のa当たりの平均収穫量(乾物)は、不耕起栽培の稲わら還元区で稲わら64.8±8.1kg、籾68.6±9.8kg、稲わら除去区でそれぞれ64.9±7.3kg、68.3±9.6kg、耕起移植栽培区でそれぞれ76.4±10.5kg、71.0±9.8kgであり、本試験の施肥条件では耕起移植栽培が不耕起栽培より稲わら、籾収量が多かった。籾のケイ酸吸収量はa当たり1.3~2.4kgで不耕起栽培と耕起栽培でほぼ

表3 不耕起栽培の地表面に還元された稲わら^{a)}からの見かけのケイ酸利用率^{b)}

| 不耕起栽培の継続年数 | | | | | % |
|------------|-----|-----|-----|-----|---|
| 3 | 4 | 5 | 6 | 9 | |
| 4.7 | 0.9 | 2.1 | 2.8 | 8.1 | % |

a) 前年に還元されたもの

b) 前年の稲わらに含まれるケイ酸含有量を、稲わら還元区と稲わら除去区のケイ酸吸収量の差で除して求めた

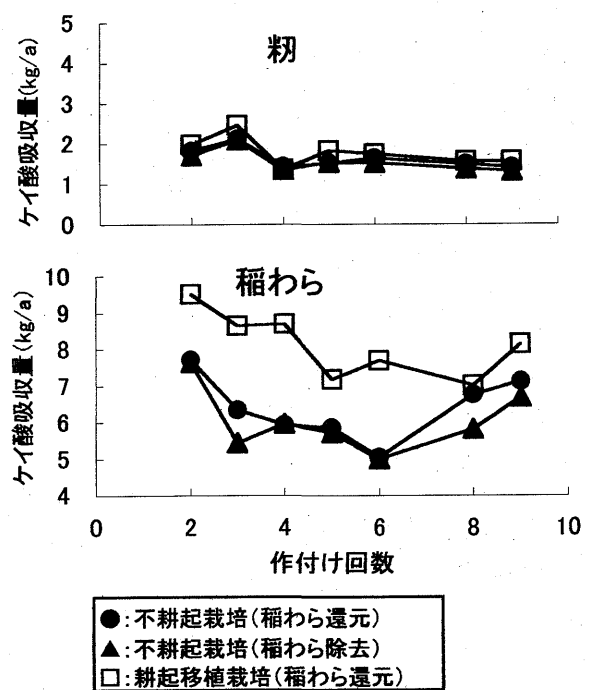


図3 栽培法の違いが稲わら、籾のケイ酸吸収量に及ぼす影響

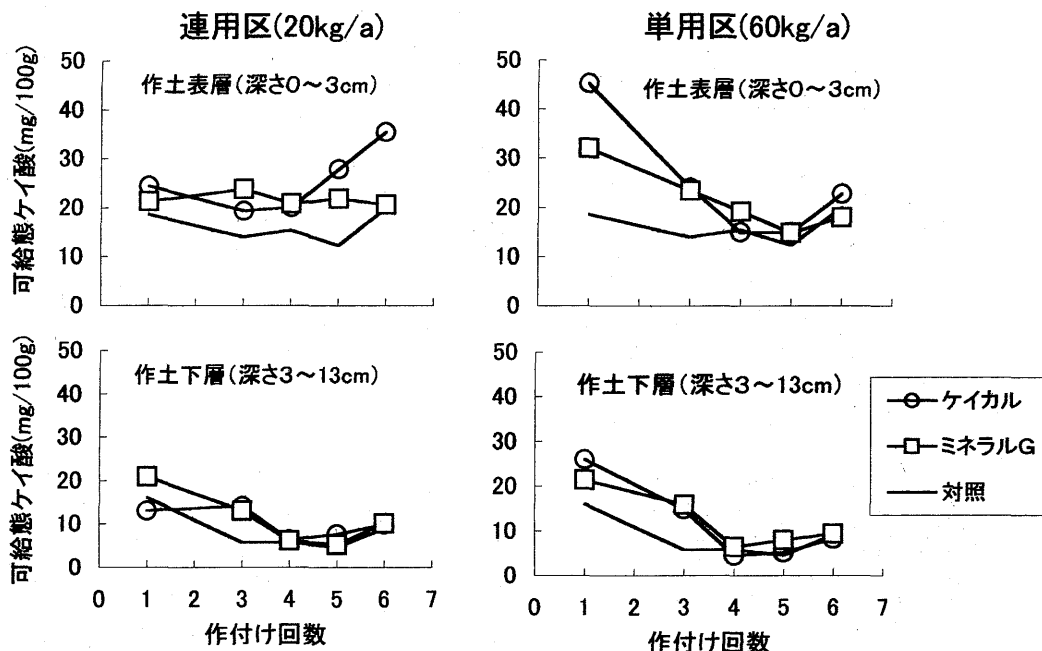


図4 ケイ酸資材の施用が不耕起栽培土壌の可給態ケイ酸含有量に及ぼす影響

同程度であった。しかし、稲わらのケイ酸吸収量は、耕起移植栽培区がa当たり平均8.1kgであるのに対して不耕起栽培では稲わら還元区が平均6.4kgと少なく、稲わら除去区では平均6.0kgとさらに少なかった(図3)。

3. ケイ酸供給力の改善効果

(1) ケイ酸資材の施用

ケイ酸資材の施用が土壌の可給態ケイ酸含有量に及ぼす影響を図4に示した。作土表層の可給態ケイ酸は、ケイ酸資材の連用によって、資材無施用区に比べて4~17mg/100g増加した。一方、資材の単用区は1作目跡地には10~25mg/100g増加したが、4作目跡地には無施用区と同程度になった。作土下層の可給態ケイ酸含有量は、連用区では変化が少ないが、単用区では施用後から3作程度の増加が認められた。

ケイ酸資材の施用による稲わらのケイ酸含有率の変化を図5に示した。資材の連用区では、1~6作目までのケイ酸含有率はケイカルが平均11.5%、ミネラルGが11.0%と無施用区の9.5%に比べて1%以上増加した。単用区でもケイ酸含有率が上昇したが、その持続期間はミネラルGが施用から約4作、ケイカルが約2作であり、資材により異なった。

各試験区における籾乾物収量の推移を資材無施用区を100とした指数で示した(表4)。連用区及び単用区ともに年による変動があるものの、いずれも平均指数101~103と無施用区と同程度であった。

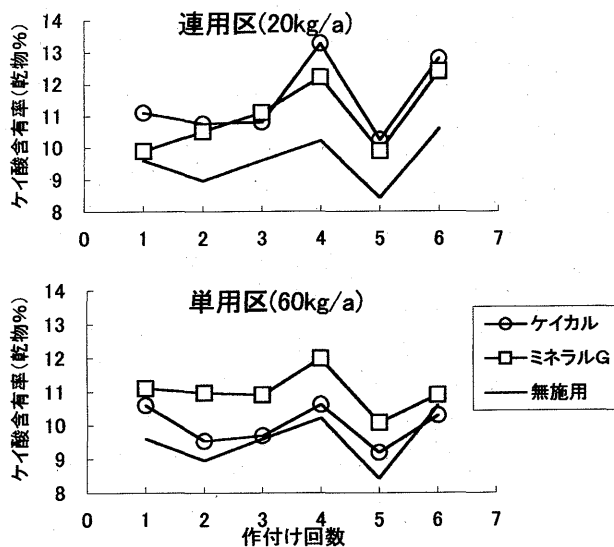


図5 ケイ酸資材の施用が稲わらのケイ酸含有率に及ぼす影響

表4 不耕起栽培におけるケイ酸資材施用区の籾乾物収量指数^{a)}

| 施用方法 | 資材名 | 不耕起栽培の継続年数 | | | | | 平均 (乾物kg/a) |
|--------|-----------|------------|-----|-----|-----|-----|----------------|
| | | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | |
| 20kg/a | ケイカル | 100 | 101 | 104 | 104 | 100 | 102 (75.7) |
| | 連用区 ミネラルG | 106 | 96 | 105 | 101 | 105 | 103 (75.8) |
| 60kg/a | ケイカル | 101 | 102 | 103 | 96 | 98 | 101 (74.4) |
| | 単用区 ミネラルG | 103 | 95 | 107 | 99 | 100 | 101 (74.7) |
| | 無施用 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 (74.0) |

^{a)} 無施用区の数値を100とした指数で示した

(2) 耕起栽培への転換の効果

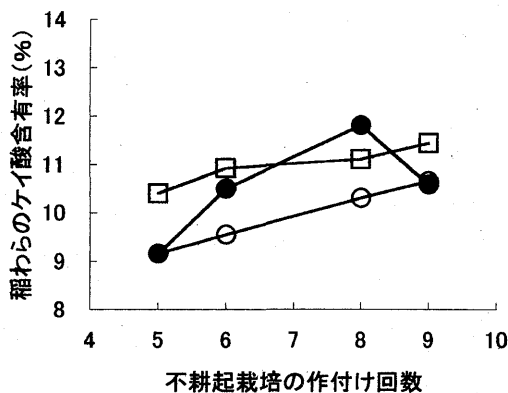
不耕起栽培を5作継続した水田を耕起栽培に転換した後の可給態ケイ酸含有量を表5に示した。不耕起栽培の可給態ケイ酸は作土表層に23mg/100g、作土下層に8mg/100gと作土表層に偏在していたが、耕起栽培に転換することにより作土表層、作土下層ともに10~13mg/100gとなった。耕起処理以降の稲わらのケイ酸含有率の推移を図6に示した。稲わらのケイ酸含有率は、耕起移植栽培に転換することによって1%以上増加して耕起移植栽培区並となり、再び不耕起栽培に戻しても3作程度の残効が認められた。

表5 不耕起栽培から耕起直播および耕起移植栽培に転換した跡地^{a)}の土壌中可給態ケイ酸含有量

| 栽培方法 | | 可給態ケイ酸含有量(mg/100g) | | |
|-------|-------|--------------------|--------------------|------------------|
| 5作目まで | 6作目 | 作土表層 ^{b)} | 作土下層 ^{b)} | 下層 ^{b)} |
| 不耕起直播 | 不耕起直播 | 23.7 | 8.2 | 3.5 |
| 不耕起直播 | 耕起直播 | 13.2 | 11.3 | 5.0 |
| 不耕起直播 | 耕起移植 | 12.0 | 10.7 | 4.9 |
| 耕起移植 | 耕起移植 | 13.9 | 13.9 | 7.0 |

a) 6作目跡地

b) 作土表層(0~3cm)、作土下層(3~13cm)、下層(13~26cm)



不耕起栽培 ○ : 1~9作目不耕起栽培
 耕起移植転換 ● : 1~5作目不耕起栽培、6作目耕起移植栽培、7~9作目不耕起栽培
 耕起移植栽培 □ : 1~9作目耕起移植栽培

図6 不耕起栽培から耕起栽培に転換したときの稲わらのケイ酸含有率

考 察

不耕起直播栽培田における土壌の可給態ケイ酸含有量及び水稻のケイ酸吸収量を耕起移植田と比較検討した。

本試験の結果から、不耕起栽培の稲わら乾物収量はa当たり平均64.8kg、ケイ酸含有率は平均9.7%であり、1作にa当たり平均6.3kgのケイ酸が地表面に供給されると推測される。不耕起栽培は土壌を耕うんしないため、稲わらに含まれるほぼ全てのケイ酸は地表面にのみ堆積す

る。ところが、不耕起栽培田の作土表層における可給態ケイ酸は、不耕起栽培の開始から3作までは増加せず、6作目から大幅に増加することが明らかになった。これは、山本ら(2001)の調査による腐植及び全窒素の集積パターンと同様であり、稲わらの集積と分解が進むにつれてケイ酸の供給量が増加したと推察された。また、岡山・吉野(1989)は土壌の還元の進行によりケイ酸の可給化が進むとし、石橋ら(2001)は不耕起栽培を始めた当初は耕起移植栽培に比べて酸化的であるが、徐々に差が小さくなり、4、5年目には同程度まで還元が進むとしている。

これらのことから、作土表層の可給態ケイ酸含有量は、主に稲わらの集積量・分解程度及び土壌の還元程度により変化し、不耕起栽培を始めて数作後から増加するものと考えられた。ただし、不耕起栽培田の作土下層の可給態ケイ酸含有量は、表2に示すように耕起移植栽培田に比べて1割以上少なく、稲わらを還元しない不耕起栽培では2割以上も少ないことから、不耕起栽培田のケイ酸供給量は耕起栽培に比べて少ないと推察された。

不耕起栽培における稲わらのケイ酸含有率は平均9.7%と、耕起移植栽培の平均10.7%に比べて約1%低く、水稻全体におけるケイ酸吸収量もa当たり1.8kg少ない。

これは、前述したように不耕起栽培田は耕起栽培田に比べて作土中の可給態ケイ酸が少ないことや、作土下層の水稻根量が少なく、作土下層からのケイ酸吸収量が少ないことが原因として考えられる。今泉・吉田(1958)は水稻に対するケイ酸肥料施用の要否判定基準として、成熟期の茎葉のケイ酸含有率が11%以下の水田で肥効が期待されるとしている。図2に示したように、不耕起栽培を5作程度継続して稲わらの集積が進むと作土表層からのケイ酸供給量が増えて水稻のケイ酸吸収量も増加するので、不耕起栽培の長期継続田ではケイ酸を補給する必要性は低いかもしれない。しかし、不耕起栽培の開始当初や稲わらを還元しない不耕起栽培では土壌のケイ酸供給量が少なく、水稻の吸収量も少ないので、ケイ酸の補給が必要と考えられる。

不耕起栽培において、施用する肥料や土壌改良資材は地表面に散布される。そこで、地表面散布におけるケイ酸資材の施用効果を検討したところ、毎作a当たり資材20kgを連用、あるいは不耕起栽培の初年目にのみa当たり資材60kgを単用することにより、土壌の可給態ケイ酸含有量を増やし、稲わらのケイ酸含有率を高める効果が確認された。資材の単用による肥効持続期間は、施用から4作程度と考えられた。ケイ酸資材の肥効は、資材の原料や製造方法などにより異なることが加藤・尾和

(1996)、住田・大山(1991)によって指摘されているが、本試験においてはミネラルGが連用区、単用区ともに安定した効果を示した。

不耕起栽培の作土表層は、ケイ酸含有率の高い稲わらを多量に蓄積している。そこで、不耕起栽培から耕起栽培に一時的に転換すると、稲わらのケイ酸含有率は耕起移植栽培と同程度まで回復し、不耕起栽培に戻しても3作程度効果が持続することが明らかになった。これは、不耕起栽培開始当初の稲わらのケイ酸含有率が耕起移植栽培と大差ないことと同じ現象と考えられ、耕起混和された稲わらからのケイ酸供給力は、3作程度持続すると推察された。この不耕起栽培と耕起栽培を組み合わせた栽培方式は、山本(1999)の報告において示したように土壌の腐植や全窒素についても増強効果があり、不耕起栽培の土壌肥沃度の改善に有効と考えられる。

摘 要

花崗岩由来の中粗粒灰色低地土圃場において、稲わらを全量還元する不耕起乾田直播栽培を9作継続し、土壌の可給態ケイ酸含有量、稲わら及び初刈のケイ酸含有率、ケイ酸吸収量から、不耕起栽培におけるケイ酸の供給能力を知るとともに、ケイ酸資材の施用あるいは耕起栽培への転換による稲わらのケイ酸含有率の改善効果を調べた。得られた結果は以下のとおりである。

1. 稲わらを還元する不耕起栽培田の可給態ケイ酸は、作土表層では不耕起栽培の開始当初は増加せず、6作目から大幅に増加する。しかし、作土下層では漸減するため、作土層に含まれる可給態ケイ酸は耕起移植田のそれより約1割少ないことが明らかになった。

稲わらを除去する不耕起栽培では、作土表層に集積する可給態ケイ酸が少ないため、作土層に含まれる可給態ケイ酸は耕起移植田より約2割少なかった。

2. 稲わら還元及び稲わら除去の不耕起栽培における水稲のケイ酸含有率は、耕起移植栽培に比べて初刈は同程度であったが、稲わらはそれぞれ平均1%、1.4%低く、11%を下回ることから、ケイ酸の補給が必要と考えられた。

ただし、稲わらを還元する不耕起栽培を7作程度継続すると、稲わらのケイ酸含有率が高まり、耕起移植栽培に近づく傾向が認められたことから、長期の不耕起継続田では、ケイ酸供給力が回復する可能性が示唆された。

3. 不耕起栽培において、ケイ酸資材を毎作a当たり20kgあるいは3年に一度a当たり60kg地表面に施用することにより、土壌のケイ酸供給量が増え、水稲のケイ

酸含有率が高くなった。

また、不耕起栽培継続田の作土表層に集積した稲わらを、3年に一回程度耕起して土壌に混和すると、水稲のケイ酸含有率が高くなった。

これらのことから、不耕起直播栽培田のケイ酸供給力は耕起移植栽培田に比べて低いので、ケイ酸資材の施用あるいは一時的な耕起栽培への転換により、ケイ酸供給力を高める必要があると考えられる。

引用文献

- 東江 栄・縣 和一・窪田文武・Peter B.KAUFMAN (1992) 水稲の光合成・乾物生産に対するケイ酸の生理的役割. 日作紀, 61(2):200-206.
- 土壌、水質及び植物体分析法(2001). (財)日本土壤協会, 東京, pp.81-84.
- 二見敬三・渋谷政夫(1990) 不耕起直播水稲の根活力分布. 土肥誌, 61:406-407.
- 今泉吉郎・吉田昌一(1958) 水田土壌の珪酸供給力に関する研究. 農技報B, 8:261-304.
- 石橋英二・赤井直彦・大家理哉・沖 和生(2001) 不耕起乾田直播栽培の継続と酸化還元電位の関係. 土肥誌, 72:535-541.
- 加藤直人・尾和尚人(1996) 鋤さいケイ酸質肥料の溶解性に及ぼすpH、カルシウム、濃度の影響. 土肥誌, 67:626-632.
- 岡山清司・吉野 喬(1989) 土壌溶液中のケイ酸濃度と水稲のケイ酸吸収. 富山県農技セ研報, 5:1-14.
- 奥田 東・高橋英一(1961) 作物に対するケイ酸の栄養生理的役割について(2). 土肥誌, 32:481-488.
- 奥田 東・高橋英一(1962) 作物に対するケイ酸の栄養生理的役割について(6). 土肥誌, 33:59-64.
- 住田弘一・大山信雄(1991) 水稲のケイ酸吸収促進に及ぼす有機物およびケイ酸石灰の施用効果. 土肥誌, 62:386-392.
- 高橋和夫・野中邦彦(1986) 水田土壌中の有効態ケイ酸の測定法. 土肥誌, 57:515-517.
- 山本章吾(1999) 水稲の不耕起乾田直播栽培を耕起栽培に転換するときの施肥法. 近畿中国地域における新技術, 34:65-67.
- 山本章吾・久山弘巳・柳井雅美(2001) 不耕起乾田直播栽培を継続した水田における土壌肥沃度および水稲の窒素吸収量. 岡山農試研報, 19:13-18.
- 長期不耕起圃場研究グループ(1994) 長期不耕起直播田の土壌及び水稲栽培の実態調査. 農業技術, 49:251-256.