

水稻に対する日照不足条件下におけるケイ酸の効果*

藤井弘志¹・森 静香²・安藤 豊¹

キーワード ケイ酸, 水稻, 日照不足, 収量

1. はじめに

山形県庄内地域の1977年～2006年の過去30年間における水稻の作況指数および一等米比率¹⁾について前半の15年間(1977年～1991年)と後半の15年間(1992年～2006年)に分けてみると、収量が低下した年次(作況指数100未満)は前半の15年間で3回、後半の15年間で7回、品質が低下した年次(一等米比率80%未満)が前半の15年間で3回、後半の15年間で6回となり、後半の15年間で収量・品質が低下する年次が増加している。後半の15年間の収量・品質低下を要因別に分類すると、登熟期間の高温に伴う白粒発生による品質低下が1994年・1999年に、生育期間(特に幼穂形成期から登熟期間)の日照不足・低温による収量・品質低下が1992年・1993年・1995年・1998年・2003年・2006年に、さらに台風に伴う潮風害による収量・品質低下が2004年に発生し、1992年～2006年の15年間で気象災害に伴う収量・品質低下が9回起きている。中でも、生育期間(特に幼穂形成期から登熟期間)の日照不足による収量・品質低下の発生頻度が高くなっている。日照不足による収量・品質の低下要因としては千粒重や登熟歩合の低下があげられ²⁾、その改善方策としては幼穂形成期から登熟期間における稲体の光合成産物量(乾物生産量)を増加させ千粒重や登熟歩合の向上を図ることが重要であると考えられる。

日照不足条件下で水稻による吸収が抑制される要素として窒素やケイ酸があることが指摘されている³⁾。廣川ら⁴⁾によれば日照不足条件下で穂肥窒素の水稻による利用率が低下すること、岡本⁵⁾によれば遮光条件下の水耕試験においてケイ酸が水稻生育の改善にある程度効果があることが指摘されている。また、窒素およびケイ酸は稲体の光合成能の向上に大きく関与している要素であることから^{6～12)}、日照不足条件下の乾物生産量の抑制に対して、稲体の窒素・

ケイ酸吸収量の減少と関連していることが示唆される。さらに、馬ら^{12～14)}は、ケイ酸は生物的ストレス(いもち病、害虫)、や非生物的ストレス(気象等)のある条件下で有益な効果が現れやすく、ストレスのない条件下では効果が現れにくい特徴を有することを指摘している。また、水稻に施用される窒素量およびケイ酸資材であるケイ酸カルシウムの出荷量の年次別推移によれば^{15,16)}、両要素とも年々水田に対する施用量が減少している。窒素施用量は良食味栽培や窒素利用効率の向上などによって昭和60年の11.4 g m⁻²から平成16年の6.8 g m⁻²に減少している。ケイ酸カルシウムの出荷量は米価低迷によるコスト削減などによって昭和60年の59万tから平成16年の20万tに大きく減少している。このように、日照不足条件下で不足しやすい要素である窒素・ケイ酸の施用量が減少している状況にある。しかし、日照不足条件下で水稻の吸収する窒素・ケイ酸の収量向上に対する効果について検討を行った事例は少ない。そこで、本報告では①収量に対するケイ酸の施用効果に及ぼす日照時間の影響について、②同一圃場における水稻のケイ酸吸収量に及ぼす日照の影響について、③水稻の窒素吸収量および穂肥窒素利用率に及ぼす日照の影響について、④穂揃期における止葉のみかけの光合成速度に及ぼす止葉のケイ酸含有率と日照との関連について検討して、日照不足条件下における水稻の収量向上に寄与するケイ酸の効果について明らかにした。

2. 材料と方法

1) 試験Ⅰ(収量に対するケイ酸の施用効果に及ぼす日照時間の影響について)

試験は1979年～1997年に山形県農業試験場庄内支場で行った。なお、1984年は圃場移転工事、1987年のデータは圃場移転後の1年日の作付のために除いた。1985年～1986年は造成工事中のために現地試験を行った。庄内支場の土壌は細粒強グライ土で、全窒素2.4 g kg⁻¹、全炭素20.7 g kg⁻¹、CEC 17.8 molc kg⁻¹であった。現地の土壌は細粒強グライ土で、全窒素3.0 g kg⁻¹、全炭素32.9 g kg⁻¹、CEC 25.1 molc kg⁻¹であった。品種は1979年～1992年までは水稻品種「ササニシキ」、1993年～1997年までは水稻品種「はえぬぎ」を供試した。移植は5月10日、栽植密度は23.8株 m⁻²、1株5本植えとした。各区共通として、基肥窒素量は、「ササニシキ」が5 g m⁻²、「はえぬぎ」が6 g

* 本報告の一部は1997年および1998年4月の日本土壤肥料学会において発表した。

¹⁾ 山形大学農学部(997-8555 鶴岡市若葉町1-23)

²⁾ 山形県農業総合研究センター農業生産技術試験場庄内支場(999-7601 鶴岡市藤島字山ノ前25)

2008年1月16日受付・2008年8月12日受理

日本土壤肥料学雑誌 第79巻 第5号 p.471～477(2008)

m²で全層に、幼穂形成期の追肥窒素量は、「ササニシキ」では1.5g m⁻²、「はえぬき」では2.0g m⁻²で表層に施用した。処理として稲わら区、稲わら+土づくり肥料施用区（以下、稲わら+土づくり区）の2区とした。土づくり肥料としては、ケイ酸カルシウム（以下、ケイカル）150g m⁻²、溶性リン肥（以下、ようりん）30g m⁻²、稲わらは500g m⁻²施用した。その他の肥培管理は庄内支場慣行とした。収量調査は100株刈りで行い常法により求めた。試験年次の平均気温および日照時間については、庄内支場の観測データを用いて移植日から成熟期までの平均値で示した。

2) 試験Ⅱ（同一圃場における水稻のケイ酸吸収量に及ぼす日照条件の影響について）

試験は1995年～1996年に山形県庄内地域の水田圃場で行った。北田ら¹⁷⁾の方法に準じた逐次上澄法でケイ酸分析を行い、ケイ酸供給量（1日当たり）が1.6～2.1mg kg⁻¹土壌（以下、ケイ酸供給量少とする）、3.5～3.7mg kg⁻¹土壌（以下、ケイ酸供給量中とする）、4.5～5.1mg kg⁻¹土壌（以下、ケイ酸供給量多とする）の3段階に区分した。ケイ酸供給量が小は鶴岡市海老島、民田、朝日、中は鶴岡市細谷、落合、廻館、高は酒田市本楯、上安田、庄内町狩川の計9ヶ所の水田を供試した。品種は兩年とも水稻品種「はえぬき」を供試し、各圃場毎の土壌条件および肥培管理については表1に示した。その他の肥培管理は農家慣行によった。収量は100株刈により求めた。試料採取は成熟期に平均穂数の3株を採取し、70℃で48時間通風乾燥して乾物重を測定した。窒素はケルダール法で、ケイ酸は硫酸-過酸化水素で分解し、ろ過、熱水洗浄後、残渣をろ紙ごと磁製のつぼに入れ、電気炉で灰化し、重量法で求めた。供試水田の土壌のケイ酸供給量については逐次上澄法¹⁷⁾で求めた。風乾土5gに脱塩水50mLを加えて30℃で培養し、約2週間間隔で上澄液をサンプリングして12週間継続し、上澄液中のケイ酸濃度についてはモリブデンブルー法で求めた。土壌からのケイ酸供給量についても北田らの方法に準じ、層位25cm、仮比重1、移植から成熟期までの地温については1995年～1996年とも庄内支場の地表下5cm地温を用いて次の式にあてはめて算出した。ケイ酸供給量（g m⁻²）= 1日当たりケイ酸量（mg 100g⁻¹土壌）×積算地温（移植～成熟期）/ 30℃×1m²土壌重量×層位（25cm）×仮比重（1）

／100g

なお、1995年～1996年の気象データ（平均気温・日照時間）についても庄内支場の観測データを用いた。平均気温および日照時間の平年値として1991年～2005年の15年間の平均値を用いた。

3) 試験Ⅲ（水稻の窒素吸収量・穂肥窒素利用率に及ぼす日射量の影響について）

試験は1994年～1995年に山形県農業試験場庄内支場で行った。土壌は細粒強グライ土壌（西山統）で、全窒素2.5g kg⁻¹、全炭素21.0g kg⁻¹、CEC 18.2mol kg⁻¹であった。品種は兩年とも水稻品種「ササニシキ」を用いて栽植密度22.2株 m⁻²、1株5本植えて5月16日に移植した。兩年とも基肥窒素量は5g m⁻²として、追肥窒素量は2.0g m⁻²とし、追肥時期は幼穂長から出穂15日前を想定した。その他の肥培管理は庄内支場の慣行法で行った。遮光は幼穂形成期～出穂期に行った。1995年は7月25日～8月10日で寒冷紗の種類を変えて遮光率36%、55%および無遮光の3処理とした。1994年の幼穂形成期～出穂期は7月15日～31日であり無遮光とした。追肥後の日射量と追肥窒素の水稻による利用率の関係を検討するために、重窒素でラベルした硫酸を施用した。施用方法は山室¹⁸⁾の方法に準じて行い、1994年は7月15日に、1995年は7月25日に施用した。具体的には平均茎数の株に対して縦0.3m×横0.15mのプラスチック枠を作土層に入れ、水溶液で重窒素硫酸（50.5ato mg kg⁻¹）を表層施肥した。施肥量は窒素で2g m⁻²とし3反復で行った。試料採取は兩年とも成熟期に行い、採取した稲体は70℃で通風乾燥後、ケルダール分解し、発光分光分析法¹⁹⁾により全窒素中の重窒素濃度を測定した。1994年～1995年における気象データ（日射量）は庄内支場の観測データを用いた。

4) 試験Ⅳ（止葉のみかけの光合成速度に及ぼすケイ酸含有率と日射量の影響について）

試験は1996年に山形県農業試験場庄内支場で行った。土壌は細粒強グライ土壌（西山統）で、全窒素2.5g kg⁻¹、全炭素21.0g kg⁻¹、CEC 18mol kg⁻¹であった。水稻品種「どまんなか」を用いて、栽植密度22.2株 m⁻²、1株5本植えて5月10日に移植した。基肥窒素量は5g m⁻²として、追肥窒素量は2.0g m⁻²とし、追肥時期は出穂25日前とし

表1 耕種概要

地区名	pH (H ₂ O)	CEC cmol _c kg ⁻¹	移植時期		土づくり肥料 (g m ⁻²)		基肥N量 (g m ⁻²)		追肥N量 (g m ⁻²)	
			1995年	1996年	1995年	1996年	1995年	1996年	1995年	1996年
鶴岡市 海老島	5.0	15.2	5月15日	5月16日	100	140	5.3	7.5	2.6	3.4
鶴岡市 伊勢横内	5.0	16.8	5月8日	5月12日	0	0	4.0	3.9	5.6	7.0
鶴岡市 三本木	5.5	22.8	5月18日	5月13日	160	160	6.8	6.9	3.9	3.7
鶴岡市 細谷	5.2	26.8	5月10日	5月13日	120	120	6.7	6.4	4.0	4.3
庄内町 廻館	5.1	26.5	5月13日	5月13日	120	120	6.0	6.0	2.6	2.0
庄内町 落合	5.1	27.2	5月10日	5月12日	40	120	10.3	9.5	1.8	1.6
庄内町 狩川	4.7	32.3	5月12日	5月11日	0	0	6.0	4.5	3.5	4.0
酒田市 本楯	5.1	34.9	5月10日	5月14日	0	40	5.8	6.1	4.0	4.5
酒田市 上田	5.1	33.5	5月8日	5月12日	0	20	6.8	6.7	2.7	2.8

*土づくり肥料：ケイ酸カルシウム

た。その他の肥培管理は庄内支場の慣行に従った。ケイ酸処理はシリカゲル無施用区（以下、無施用区とする）、シリカゲル 25 g m⁻² 区（以下、シリカ 25 区とする）、シリカゲル 200 g m⁻²（以下、シリカ 200 区とする）の 3 処理とし、9 株枠を設置し、反復数は 1 区 9 株枠 5 反復とした。みかけの光合成速度の測定は、携帯型光合成測定装置（ライカ社、LI-6400）を用いて、8 月 12 日（穂揃期）の午前 9 時～11 時に主茎の葉身中央部で測定した。測定部位の光量子量については人工光を用いて変化させ、2000, 1500, 1000, 500 μmol m⁻² s⁻¹ の 4 レベルで測定した。測定時の気象条件は気温が 26～29℃、相対湿度が 66%～77%、露地地温が 24～25℃であった。測定は各ケイ酸処理 5 反復で行った。収量は 9 株刈（9 株枠 3 反復）により求めた。試料採取は光合成測定後に止葉を採取し、葉面積を測定後、70℃で 48 時間通風乾燥して乾物重を測定した。窒素はケルダール法で、ケイ酸は硫酸－過酸化水素で分解し、ろ過、熱水洗浄後、残渣をろ紙ごと磁器製のつぼに入れ、電気炉で灰化し、重量法で求めた。1996 年における気象データ（平均気温・相対湿度）は庄内支場の観測データを用いた。

3. 結 果

1) 試験 I（収量に対するケイ酸の施用効果に及ぼす日照時間の影響について）

コンバインが主流である収穫体系においては稲わらが圃場に施用されることから、収量に対するケイ酸の施用効

表 2 収量に対するケイ酸施用効果と平均日照時間について

年次	平均日照時間 (h)	日照時間 分類	平均気温 (°C)	稲わら区 収量 (g m ⁻²)	稲わら+土づくり区 収量比
1979年	7.1	並	21.4	557	116
1980年	7.3	並	21.0	654	105
1981年	7.1	並	20.4	607	101
1982年	7.9	多	20.6	625	102
1983年	7.0	並	21.1	668	110
1985年	8.3	多	21.9	684	100
1986年	5.5	少	20.2	660	103
1988年	6.9	並	20.8	624	104
1989年	7.2	並	21.1	587	107
1990年	6.5	並	21.9	624	104
1991年	6.5	並	21.5	582	105
1992年	6.8	並	20.7	519	103
1993年	5.1	少	19.4	387	122
1994年	8.3	多	23.5	601	101
1995年	5.9	少	21.3	461	113
1996年	7.4	並	21.1	578	104
1997年	7.4	並	21.8	607	104
平均	7.0		21.2	590	106

平均日照時間・平均気温：移植～成熟期

稲わら区（ケイ酸無施用）：ササニシキ⇒基肥窒素量（5 g m⁻²）+追肥窒素量1.5 g m⁻²）+稲わら500 g m⁻²、はえぬぎ⇒（6 g m⁻²）+（2.0 g m⁻²）+（500 g m⁻²）

稲わら+土づくり肥料区：上記+ケイカル（150 g m⁻²）+よりりん（30 g m⁻²）

土づくり区収量比：ケイ酸施用区収量/ケイ酸無施用区収量×100

果に及ぼす日照時間の影響について稲わら施用区で評価した。表 2 には稲わら区の収量を 100 とした時の稲わら+土づくり（ケイ酸施用）区の収量の比率および移植してから成熟期までの平均日照時間・平均気温を示した。平均日照時間とケイ酸の施用効果を示す収量比（ケイ酸施用区収量/ケイ酸無施用区収量）の関係を図 1 に示した。平均日照時間が少ない年次（5.1～5.9 時間、平均 5.5 時間）である 1986 年、1993 年および 1995 年における収量比は平均 113（103～122）、平均日照時間が平均的な年次（6.9～7.3 時間、平均 7.0 時間）における収量比は平均 106（101～116）であった。一方、平均日照時間が長い年次（7.9～8.3 時間、平均 8.1 時間）である 1982 年、1985 年および 1994 年における収量比は平均 101（100～102）で、収量向上に対するケイ酸の施用効果は稲作期間中の日照時間の多い年次よりも日照時間が少ない年次および平年的な年次で高い傾向であった。移植から成熟期までの日平均日照時間と収量向上に対するケイ酸施用の効果を示す収量比（ケイ酸施用区収量/ケイ酸無施用区収量）との間には $r = -0.616$ で負の相関関係が認められ、1% 水準で有意であった。

2) 試験 II（同一圃場におけるケイ酸吸収量に及ぼす日照条件の影響解析）

1995 年と 1996 年における稲作期間（移植から成熟期）の気象条件は、積算気温（平年値 2,847℃）が 1995 年 3,070℃、1996 年 3,026℃とほぼ同一であった。一方、積算日照時間（平年値 959 時間）は 1995 年が 832 時間、1996 年 1073 時間であり、1996 年の日照時間は 1995 年のそれに比べて 29% 多かった。1995 年の日照時間は平年のそれに比べて 13% が少なく日照不足年次であった。土壌からのケイ酸供給量は 1995 年および 1996 年の地温（庄

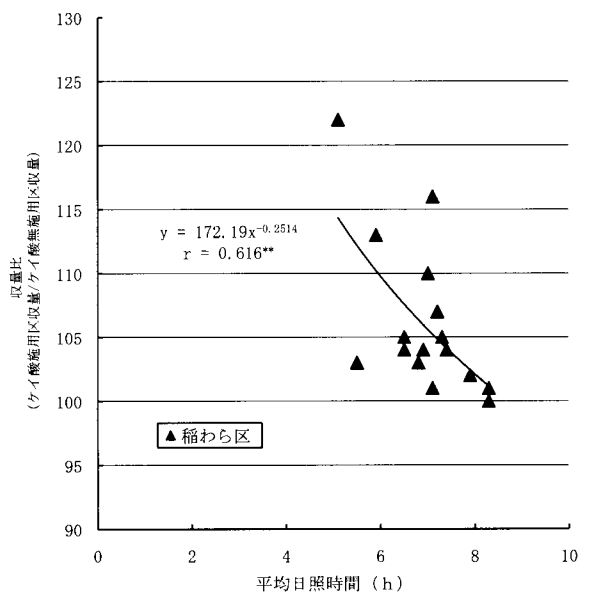


図 1 平均日照時間と収量比（ケイ酸施用区収量/ケイ酸無施用区収量）の関係（ $n = 16$ ）**：1% 水準で有意

内支場) がほぼ同一であったことからほぼ同じであると考えられる(表3)。また、表1に示したように施肥窒素量および土づくり肥料(ケイ酸)の施用量は両年もほぼ同一であり、水稻によるケイ酸吸収量や収量に及ぼす気象条件、特に日照時間の影響を検討するには好適な条件であると考えられる。水稻による成熟期におけるケイ酸吸収量は土壌のケイ酸供給量の低、中および高で、1996年の場合それぞれ87, 132および148 g m⁻²、1995年の場合それぞれ78, 110および125 g m⁻²であり、土壌によるケイ酸供給量の高低にかかわらず水稻によるケイ酸吸収量は1996年 > 1995年で、いずれも5%水準で有意であった。同様に、成熟期における茎葉のケイ酸含有率は、土壌ケイ酸供給量の低、中および高で、1996年の場合それぞれ81, 139および146 g kg⁻¹、1995年の場合それぞれ75, 121および128 g kg⁻¹であり、土壌によるケイ酸供給量の高低にかかわらず、茎葉のケイ酸含有率は1996年 > 1995年であった。収量は1996年 > 1995年であり、土壌によるケイ酸供給量が中および高の場合は5%水準で有意であった。成熟期における窒素吸収量についても1996年 > 1995年であった。

3) 試験Ⅲ(水稻の穂肥窒素利用率に及ぼす日射量の影響について)

施用した穂肥窒素が水稻に吸収される期間は施用後7~10日であることから²⁰⁾、試験年次の幼穂形成期から出穂期までの日照時間と日射量について比較すると、1994年は7月15日~31日(16日間)でそれぞれ184 hおよび545 MJ、1995年は7月25日~8月10日(16日間)における無遮光区の日照時間および日射量はそれぞれ94 hおよび324 MJ、遮光率36%区の日射量は208 MJ、遮光率58%区の日射量は146 MJであった。なお、幼穂形成期~出穂期(16日間)の過去10年間の平均日射量は432 MJであり、1994年の日射量は平均日射量に比べて26%多く、逆に1995年の日射量は平均日射量に比べて25%少なかった。表4に示したように、水稻による穂肥窒素の利用率は、日射量545 MJで57.9%、325 MJで40%、208 MJで34.8%、146 MJで31.4%で幼穂形成期~出穂期の日射量に対応して低下した。

4) 試験Ⅳ(止葉のみかけの光合成速度に及ぼすケイ酸含有率と日射量の影響について)

みかけの光合成速度測定時(穂揃期)における止葉のケイ酸含有率はシリカ200区が114 g kg⁻¹、シリカ25区が108 g kg⁻¹、無施用区が97 g kg⁻¹であった(表5)。各光

表3 ケイ酸吸収・窒素吸収および収量に及ぼす気象条件の影響

場所	土壌由来ケイ酸供給量 (g m ⁻²)		成熟期				収量 (g m ⁻²)			
	1995年	1996年	ケイ酸 (SiO ₂) 吸収量 (g m ⁻²)		窒素吸収量 (g m ⁻²)		茎葉ケイ酸含有率 (SiO ₂)(g kg ⁻¹)			
			1995年	1996年	1995年	1996年	1995年	1996年		
海老島	47	48	76	90	16.3	16.6	76	83	620	748
伊勢横内	40	41	81	87	14.3	14.7	82	82	565	724
三本木	37	37	78	83	13.6	14.5	68	78	479	525
平均	41	42	78	87	14.7	15.3	75	81	555	666
	NS		*		NS		NS		NS	
細谷	79	80	100	125	15.2	16.1	116	136	561	617
廻館	85	86	115	141	11.8	13.3	118	133	587	624
落合	82	83	116	131	11.1	13.2	129	149	547	607
平均	82	83	110	132	12.7	14.2	121	139	565	616
	NS		*		NS		*		*	
狩川	117	118	131	150	11.9	13.3	132	155	560	616
本楯	103	105	111	144	13.5	17.6	122	137	592	666
上田	103	104	132	150	14.2	13.6	131	147	569	666
平均	108	109	125	148	13.2	14.8	128	146	574	649
	NS		*		NS		*		*	

*: 処理区間において、5%水準で有意差あり。

NS: 処理区間において有意差がないことを示す。

表4 日射量別穂肥窒素の利用率

年次	処理	日射量 MJ	成熟期					
			全N吸収量 (g m ⁻²)	穂肥N吸収量 (g m ⁻²)	穂肥N利用率 (%)			
1994年	遮光率0%	545	12.5	a	1.16	a	57.9	a
1995年	遮光率0%	325	10.8	b	0.80	b	40.0	b
	遮光率36%	208	10.2	b	0.69	c	34.8	c
	遮光率55%	146	9.6	b	0.63	c	31.4	c

日射量: 1994年7月15日~31日, 1995年7月25日~8月10日

穂肥N利用率: 穂肥N吸収量 / 穂肥N量 (2 g m⁻²) × 100

Fishers LSD (p < 0.05) により有意差検定を行った。それぞれ、異なるアルファベットは5%水準で有意差あり。

表5 みかけの光合成速度 ($\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$)

区名	ケイ酸 (SiO_2) 濃度 (g kg^{-1})	光子量子量 ($\mu\text{mol}^{-2} \text{ s}^{-1}$)				SLW (g cm^{-2})	単位葉面積当たり 窒素量 (mg cm^{-2})
		2000	1500	1000	500		
無施用	97	18.0 a	17.0 a	15.4 a	11.9 a	4.19 a	0.096 a
シリカ25	108	21.0 b	20.0 b	18.4 b	14.6 b	4.66 b	0.107 b
シリカ200	114	21.7 b	20.9 b	19.1 b	15.4 b	4.84 b	0.112 b

SLW：比葉重

Fishers LSD ($p < 0.05$) により有意差検定を行った。それぞれ、異なるアルファベットは5%水準で有意差あり。

表6 ケイ酸施用による収量および乾物増加量に対する効果

区名	収量 (g m^{-2})	乾物重 (g m^{-2})		乾物増加量 (g m^{-2}) 成熟期－穂揃期
		穂揃期	成熟期	
無施用	606 ± 20	775 ± 35	1577 ± 67	802 ± 31
シリカ25	617 ± 14	831 ± 28	1667 ± 30	836 ± 5
シリカ200	656 ± 12	871 ± 17	1785 ± 62	914 ± 47

平均値 ± SD

量子量における止葉のみかけの光合成速度はシリカ200区 > シリカ25区 > 無施用区であり、無施用区とシリカ施用区のみかけの光合成速度は5%水準で有意であった(表5)。比葉重および単位葉面積当たり窒素量はシリカ200区 > シリカ25区 > 無施用区であった。結果的な精玄米重はシリカ200区で 656 g m^{-2} 、シリカ25区で 617 g m^{-2} 、無施用区で 606 g m^{-2} で、出穂期～成熟期の乾物生産増加量もシリカ200区 914 g m^{-2} 、シリカ25区で 836 g m^{-2} 、無施用区で 802 g m^{-2} とケイ酸施用によって高くなる傾向であった(表6)。

4. 考 察

近年、気象変動に伴う水稻の収量・品質が低下する年次が増加している。日本有数の米産地である山形県の庄内地域でも収量・品質の低下する年次が発生している。収量・品質低下に関与する気象条件としては、登熟期間中の高温、低温・日照不足等があげられる。収量の安定生産に寄与する肥培管理技術の導入が重要となっている。その中で、ケイ酸が気象等の非生物学的ストレスの緩和に有用であることも指摘されている¹²⁻¹⁴⁾。そこで、日照不足条件下における収量向上に対するケイ酸の施用効果について考察する。

移植時期から成熟期までの稲作期間中の平均日照時間が平年よりも多い年次の場合には収量に対するケイ酸施用の効果(ケイ酸施用区収量/ケイ酸無施用区収量比)は101に対して、平均日照時間が平年よりも少ない年次のそれは113、平均日照時間が平均的な年次のそれは106と向上した。収量向上に対するケイ酸施用の効果は稲作期間中の平均日照時間が少ない年次および平均的な年次で高いことから、日照不足条件下における収量向上に対してケイ酸施用は有用な技術であることを示唆している。

日照不足条件下でケイ酸施用が収量向上に効果的な理由は次のように考えられる。低温によって吸収が抑制される要素としてはケイ酸・カリウム・リン酸および窒素であること、日照不足によって吸収が抑制される要素としては窒素・リン酸およびケイ酸があることが馬場³⁾らによって指摘されている。さらに、窒素とケイ酸は水稻の光合成に

大きな影響を与えている要素である。前⁶⁾・秋田⁷⁾によれば、窒素栄養は単位葉面積当たりの光合成能力と葉面積の拡大を通して個体あるいは単位土地面積当たりの光合成能力・乾物生産能力に大きな影響を与えていて、単位葉面積当たりの窒素含量と光合成能力とは正の相関関係があることが指摘されている。一方、ケイ酸による水稻の光合成促進の要因としては、①ケイ酸を吸収すると葉身表面のクチクラ層に集積してクチクラ蒸散を抑制し葉身内に生じる水分ストレスの緩和⁸⁾、②比葉重が高くなり単位葉面積当たり窒素量が多いこと^{6,10)}、③多量のケイ酸を吸収すると葉身が直立型になるため受光態勢が改善され群落の乾物生産量が増加することが指摘されている^{9,10,12)}。本報告において、ケイ酸含有率の異なる葉身のみかけの光合成速度について光条件を変化させて検討した結果によってもケイ酸含有率の高い葉身の光合成能力は光条件にかかわらず高い傾向が認められた。この要因としては、光合成測定時の相対湿度は66～77%の条件下で実施したので水分ストレスは認められないことから、比葉重の向上による単位葉面積当たりの窒素量が高いことであると考えられる。この事実も日照不足条件下における対策としてケイ酸の効果的重要であることを示唆している。

水稻に対するケイ酸の供給源には、土・灌漑水・資材等があげられる。その中で、1996年における灌漑水中のケイ酸濃度が1956年のそれに比べて減少していることが熊谷ら²¹⁾によって指摘されている。さらに、水稻に施用されている窒素量およびケイ酸石灰量も著しく減少している状況にあり、現在の水稻生産は、水稻に対するケイ酸および窒素の供給の観点からも日照不足に弱い生産体制になっている。この点からも水稻の収量形成に対するケイ酸施用の重要性が認められる。

事実、土壌からのケイ酸供給量の異なるほ場におけるケイ酸・窒素吸収に対する日照条件の影響を検討した結果によれば、日照時間の少ない年次は土壌からのケイ酸供給量の大小にかかわらず水稻によるケイ酸・窒素吸収量が少なくなり収量も減少する傾向であった。この結果からも日照の少ない条件では水稻による窒素とケイ酸の吸収量が抑制

され光合成能の低下に結びついていることが示唆される。一方、高温多照年には成熟期のわらのケイ酸含有率が高まることを高橋・野中ら²²⁾が指摘している。さらに、施用した窒素の吸収利用率も日照不足によって低下することが本試験でも得られ、廣川ら⁴⁾の結果と同様であった。以上のことから、水稻の光合成促進のためにケイ酸と窒素が重要であり、しかも、日照不足年次に吸収が抑制されるケイ酸・窒素の水稻による吸収量を促進することが光合成促進(乾物生産量の向上)に結びつくことから、日照不足年次の収量・品質向上に重要である。この点については、住田ら²³⁾も水稻のケイ酸吸収力および土壌のケイ酸供給力には温度依存性があり、低温年には温度依存性の少ないケイ酸石灰の施用が有効であることを指摘している。

今後は、水稻に対するケイ酸の施用量が年々減少している中で、ケイ酸の施用を促進するためには経済性や省力性も考慮した施用法の検討が必要であると考えられる。

5. 要 約

日照不足条件下で水稻の吸収する窒素・ケイ酸の視点で解析し、収量向上に対する検討を行った。

1) 稲作期間中の平均日照時間が平年よりも多い年次の場合には収量に対するケイ酸の効果を示す収量比(ケイ酸施用区収量/ケイ酸無施用区収量)は稲わら施用系列で101に対して、平均日照時間が平年よりも少ない年次のそれは稲わら施用系列で113、平均日照時間が平均的な年次のそれは稲わら施用系列で106と向上した。このことから、収量向上に対するケイ酸施用の効果は稲作期間中の平均日照時間が少ない年次および平均的な年次で高い傾向であった。

2) 水稻による成熟期におけるケイ酸吸収量は土壌のケイ酸供給量の高低にかかわらず日照時間の多い1996年が1995年より高く、いずれも5%水準で有意であった。同様に、収量および成熟期における窒素吸収量についても日照時間の多い1996年が1995年より高い傾向であった。

3) 水稻による穂肥窒素の利用率は、日射量545 MJで57.9%、325 MJで40%、208 MJで34.8%、146 MJで31.4%で幼穂形成期~出穂期の日射量に対応して低下した。

4) 各光量子量における止葉のみかけの光合成速度はシリカ200区>シリカ25区>無施用区であり、無施用区とシリカ施用区のみかけの光合成速度は5%水準で有意であった。収量はシリカ200区で656 g m⁻²、シリカ25区で617 g m⁻²、無施用区で606 g m⁻²で、出穂期~成熟期の乾物生産増加量もシリカ200区914 g m⁻²、シリカ25区で836 g m⁻²、無施用区で802 g m⁻²でケイ酸施用によって高くなる傾向であった。

文 献

- 1) 米に関する資料, 山形県農林水産部
- 2) 山形県農業試験場庄内支場成績
- 3) 馬場 昶・高橋保夫・岩田岩保: 水稻の胡麻葉枯病罹病に関する栄養生理的研究 (6) 日照が無機成分の吸収に及ぼす影響, 日作紀, 22, 49~50 (1952)
- 4) 廣川智子・伊藤純雄・北川靖夫: 日照, ケイ酸施用, 降下浸透が水稻の穂肥窒素利用率に及ぼす影響, 土肥誌, 64, 650~654 (1993)
- 5) 岡本 嘉: シャ光下の水稻生育におよぼすケイ酸の影響, 日作紀, 39, 242~243 (1970)
- 6) 前 忠彦: 植物栄養学, p.117~123, 文永堂, 東京 (2001)
- 7) 秋田重誠: 作物の光合成, 光呼吸の種間差 第1報, 光合成, 光呼吸および生育にみられる酸素濃度に対する反応の種間差, 農研報 D31, 1~58 (1980)
- 8) 間藤 徹・村田伸治・高橋英一: イネへのケイ酸施用が有用である理由, 土肥誌, 62, 248~251 (1991)
- 9) 高橋英一: ケイ酸植物と石灰植物, p.110~118, 農文協, 東京 (1987)
- 10) 藤井弘志: 水稻の生育・収量・食味に及ぼすケイ酸の効果, ケイ酸と作物生産, p.39~76, 博友社 (2002)
- 11) 東江栄・縣和一・窪田文武・Peter B.Kaufman: 水稻の光合成・乾物生産に対するケイ酸の生理的役割, 第1報, ケイ酸および遮光の影響, 日作紀, 61, 200~206 (1992)
- 12) 馬建鋒: 植物栄養学, p.185~192, 文永堂, 東京 (2001)
- 13) 馬建鋒: イネのケイ酸要求性と吸収特性, イネの生産性・品質と栄養生理, p.37~54, 博友社 (2006)
- 14) Ma, J.F., Miyake, Y. and Takahashi, E: Silicon in Agriculture, Chapter 2 Silicon as a Beneficial Element for Cropplants, Datonoff, L., Korndorfer, Gand Snyder, G. eds, first edition, Elsevier Science, Amsterdam, p.17~39 (2001)
- 15) 水稻の施肥窒素量の推移, 農林水産省, 米生産費調査
- 16) 珪酸石灰の出荷量の推移, 珪酸石灰肥料協会
- 17) 北田敬宇・亀川健一・秋山 豊: 逐次上澄液法による輪換田土壌ケイ酸の有効化家庭の解明, 土肥誌, 63, 31~38 (1992)
- 18) 山室成一: 水田土壌中における施肥窒素の有機化・脱窒および水稻による吸収, 土肥誌, 52, 141~148 (1981)
- 19) 狩野宏美・米山忠克・熊澤喜久雄: 発光分析法による重窒素の定量法について, 土肥誌, 45, 549~559 (1974)
- 20) 庄子貞雄・前 忠彦: 作物の生態生理, p.100~102, 文永堂, 東京 (1984)
- 21) 熊谷勝巳・今野陽一・黒田 潤・上野正夫: 山形県における農業用水のケイ酸濃度, 土肥誌, 69, 636~637 (1998)
- 22) 高橋和夫・野中邦彦: 水田土壌の有効態ケイ酸に関する研究 (第2報) 有効態ケイ酸の測定法の開発と土壌診断への適用, 四国農試報, 47, 16~39 (1986)
- 23) 住田弘一・大山信雄: 水稻のケイ酸吸収および水田土壌のケイ酸供給におよぼす温度の影響, 土肥誌, 61, 253~259 (1990)

Effects of silicate fertilizer application on the yield of rice plants grown under insufficient light condition.

Hiroshi FUJII¹, Shizuka MORI² and Ho ANDO¹

¹Yamagata Univ, ²Yamagata General Agricultural Research Center, Department of Agro-Production Science

Field experiments were conducted to evaluate the effects of nitrogen and silica on the yields of rice plants under insufficient light condition. Results obtained were as follows:

1. A linear negative relationship was observed between sunshine irradiation periods and the rice yield ratios of Si-application plot to no Si-application plot in rice straw application experiment. The rice yield ratios were 113, 106, and 101 for the year of shorter, average, and longer sunshine irradiation periods (average irradiation time; 5.5, 7.0, and 8.1 h d⁻¹), respectively. This result indicates that Si application is more effective for the rice yield in relatively shorter sunshine irradiation than in longer irradiation.

2. The amounts of SiO₂ and N uptake by rice plants and the rice yields were higher in the year of longer sunshine irradiation (1996) than in the shorter year (1995), regardless of soil type (significant at 5% level).

3. The recoveries of topdressed N by rice plants in the panicle formation stage were 57.9, 40.0, 34.8, and 31.4% under irradiation conditions of 545, 325, 208, and 146 MJ, respectively.

4. Apparent photosynthetic rate of flag leaf was significantly higher in Si application plot than in no Si application plot. In addition, brown rice and dry matter productions in the heading to maturity stages of rice were higher in Si application plot than in no Si application plot.

Key words: insufficient light condition, rice plant, rice yield, silicic acid.

(Jpn. J. Soil Sci. Plant Nutr., 79, 471–477, 2008)