

## 第5章 不稔軽減と高品質米生産を目指したケイ酸の合理的施肥法

### 5-1 既往の知見

#### (1) 水稻栄養条件と不稔発生の関係

北海道のような寒冷地では、ほぼ4年に1回の割合で冷害の被害を受けている<sup>139,140</sup>。冷害には、障害型と遅延型があり、さらに障害型には穂ばらみ期の低温障害と開花期の低温障害が含まれる。被害が大きい冷害は、出穂期前10～15日頃の穂ばらみ期障害型であり、不稔歩合が顕著に増加することにより、収量・品質に大きな影響を及ぼす<sup>141,142</sup>。そのため、北海道ではこれまでに品種改良や水稻栽培法の改善により、穂ばらみ期障害型冷害に対する多くの対策が指導されてきた<sup>141,143</sup>。耐冷性と葉身窒素濃度の関連は良く知られており、窒素濃度の増加が不稔発生を助長することから、その対策として過剰な窒素吸収の抑制が指導されてきた。止葉抽出期の限界葉身窒素濃度は「きらら397」で、2.9～3.5%とされる<sup>139,144</sup>。また、低温による不稔の原因はおしべ側にあり、葯長が短く、充実花粉数の少ない葯で稔性が劣ることが明らかにされている<sup>145,146</sup>。北海道における1993～1996年の調査結果でも、葯長1.8mm以上の場合には不稔歩合が20%以下と低く、1.8mm以下では葯長の短縮に伴い不稔歩合は増加、1.2mm以下ではほぼ100%が不稔となった<sup>147</sup>。

稲体の耐冷性を増すためには、稲体窒素含有量を低下させることが望ましく<sup>139</sup>、その低下には窒素施肥量の削減が最も有効かつ容易な対策である。北海道においては、基肥量を8～9割に押さえて、残り1割～2割は気象を見極めて幼穂形成期後7日目に追肥することが昭和38年以降の基本技術となっている<sup>38,122</sup>。しかし、耐冷性強化を目的とした大幅な窒素削減は収量確保の観点から困難であり、窒素施肥に依存しない冷害対策も必要である。過去のいくつかの報告から、ケイ酸含有量と窒素含有量は負の相関関係にあることが認められている<sup>27,148</sup>。また、ケイ酸カルシウムを施用した場合に不稔歩合が低下した事例もある<sup>149,150</sup>。

#### (2) ケイ酸栄養と産米品質の関係

水稻の生育と収量に対する要因としては、窒素栄養条件とともにケイ酸の栄養条件が重要な役割を担うとする知見が多い。すなわち、水稻のケイ酸栄養を改善することにより、光合成量の増加、受光態勢の改善、根活性の向上や枯れ上がりの抑制、耐病害虫性の向上

などの効果があるとされ<sup>24,25</sup>、安定・多収のためには窒素肥料と各種ケイ酸質肥料のバランスのとれた施用が指導されてきた<sup>26,151</sup>。また、水稻のケイ酸吸収の促進は白米中のタンパク質含有率を低下させることが報告されており、北海道においても、適正客土による泥炭地産米産の食味向上<sup>33</sup>や低タンパク質米生産のための稲体および土壌のケイ酸指標<sup>10,27</sup>などが報告されている。

しかし、稲作のコスト削減、省力化などの観点から、ケイカルなどケイ酸質肥料の使用は年々減少する現状にある<sup>59</sup>。この要因としては、ケイ酸の施用効果が窒素の施用効果などと異なり、生育の差として明瞭に現れない場合があるためと考えられる。しかし、灌漑水路の整備による水質変化<sup>152</sup>や稲わら堆肥など有機物施用の減少により、水田に対するケイ酸の供給量は減少傾向にあると予想される。ゆえに、近年における土壌や水稻のケイ酸栄養は低化しており、このことが収量・品質の不安定性や地域間の品質変動の一要因と考えられる。

したがって、産米品質と食味向上には、ケイ酸を効果的に吸収させる方法が重要となる。その方策としては、溶解性の高いケイ酸質肥料の開発を図るとともに、施肥方法を改善し、施肥ケイ酸の利用率を向上することが必要である。ケイ酸と窒素の吸収を対比させてみると、幼穂形成期以前の窒素吸収量が総窒素吸収量の半量程度を占めているのに対して、ケイ酸の吸収量は幼穂形成期以降に著しく増加する<sup>153</sup>。この要因には、水稻側の要因と土壌側の要因に分かれると思われる。水稻側の要因は根群が作土層に十分に伸長していない生育初期の場合、ケイ酸の積極的吸収が難しいこと、水稻のケイ酸要求度がまだ高まっていないことが考えられる。土壌側の要因は、土壌還元が発達に伴い溶出が促進されることから、生育後半に土壌還元が進むことにより、ケイ酸供給能が高まるものと考えられる。したがって、幼穂形成期以降のケイ酸供給を重視したケイ酸質肥料の施用が重要となる。

### 5-2 実験方法および結果

#### 5-2-1 ケイ酸栄養条件が不稔発生および産米品質に及ぼす影響

##### 実験方法

### 試験1 (圃場試験)

#### 1) 供試圃場と栽培概要

試験は1998年に上川農業試験場水田で実施した。水田土壌は褐色低地土で、作土の土色は黄褐色、土性がSCL、全炭素：12.6g kg<sup>-1</sup>、全窒素：1.5g kg<sup>-1</sup>、CEC：13.2 cmol<sub>c</sub>kg<sup>-1</sup>、pH(H<sub>2</sub>O)：6.1、可給態リン酸(ブレイNo.2法)：239mg kg<sup>-1</sup>、可給態ケイ酸(40℃-1週間湛水保温静置法)：104mg kg<sup>-1</sup>、可給態窒素(30℃-4週間湛水培養法)：70mg kg<sup>-1</sup>であり、基盤整地時の圧密により作土下の緻密度が少し高いものの、圃場全体の排水性は比較的良好である。

供試品種は北海道の奨励品種である「きらら397」を用いた。中苗箱マット苗を用いて条間30cm、株間12cmで、各区15列×30株=450株を手植え(4本植)した。移植は5月26日に行った。

#### 2) 試験処理

本試験では、北海道における施肥窒素量が概ね8~9g m<sup>-2</sup>程度<sup>59)</sup>であることから、標準窒素施肥を9g m<sup>-2</sup>とし、基肥窒素量で6, 9, 12g m<sup>-2</sup>区(以降は基肥6, 9, 12区とする)と基肥窒素9g m<sup>-2</sup>+追肥窒素3g m<sup>-2</sup>区(以降は基肥9+追肥3区とする)を設けた。さらに、ケイ酸無施用区、ケイ酸基肥区、ケイ酸追肥区を設けて窒素施肥処理と組み合わせ、2反復で処理した。基肥は耕起後に施用し、施用後に深さ12~13cmで碎土・混和した。追肥は幼穂形成期に落水し、表面施用で行った。全試験区とも幼穂形成期~出穂期の期間は田面水深1cm以下の浅水で管理した。

肥料は高度化成444を用いて、窒素(N)-リン酸(P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>)-カリウム(K<sub>2</sub>O)が6-6-6g m<sup>-2</sup>となるように施用し、基肥窒素量9および12g m<sup>-2</sup>区の処理では不足分を硫酸で追加した。また、リン酸とカリウムはPK化成肥料で各々2g m<sup>-2</sup>を追加した。ケイ酸の施用には土壌pHの変化を伴わないシリカゲルを用いて基肥、追肥とも100g m<sup>-2</sup>施用した。北海道では土壌型に応じて90~180g m<sup>-2</sup>のケイカル施用(可溶性ケイ酸換算で27~54g m<sup>-2</sup>を指導しているが<sup>151)</sup>、本試験では処理効果を明瞭にするためこれより多い条件を設定した。

#### 3) 調査及び分析方法

止葉期の茎葉の分析用試料には、10株の茎数を調査し、その中から中庸な2株を採取した。これを、茎(稈+葉鞘)と葉身に分解し、70℃で乾燥、粉碎した。全窒素含有量はケルダール法により硫酸一過酸化水素分解した分解液を、オートアナライザー(AACS II(株)ブラン・ルーベ社製)を用いて定量した。ケイ酸含有量

は硝酸一過塩素酸分解後、重量法により定量した。また、茎中の炭水化物含有量は、オートクレイブ内で熱水抽出(125℃で1時間)したものに、グルコアミラーゼ酵素を添加、55℃で1晩放置後に濾過して得られた濾液をオートアナライザー-AACS II(株)ブラン・ルーベ社製)を用いてフェリシアン化カリ法により定量した<sup>154~156)</sup>。

葯長の測定には生育中庸な株から、出穂始めの3穂を抜き取り、上から3番目の一次枝梗の3~5番目の穎花から葯を採取したのを用いた。これを黒いカルトンに配置し、高解像度デジタルカメラで撮影した後、画像解析ソフトNIHimage1.6.1(National Institutes of Health, USA)により葯長の測定を行った。

### 試験2 (ポット試験)

#### 1) 供試圃場および栽培概要

試験は1998年に5Lポット(市販のポリバケツ)で実施した。ポットの土壌は雨よけハウス内で乾燥保管していた土壌をポット当たり4kg用い、土性がCL、全炭素：31.1g kg<sup>-1</sup>、全窒素：2.2g kg<sup>-1</sup>、CEC 21.0cmol<sub>c</sub>kg<sup>-1</sup>、pH(H<sub>2</sub>O)：5.8、可給態リン酸(ブレイNo.2法)：693mg kg<sup>-1</sup>、可給態ケイ酸(40℃-1週間湛水保温静置法)：90mg kg<sup>-1</sup>、可給態窒素(30℃-4週間湛水培養法)：131mg kg<sup>-1</sup>であった。

供試品種は北海道の奨励品種である「きらら397」を用いた。中苗箱マット苗を用いてポット当たり3株を手植え(4本植)した。移植は5月28日に行った。

#### 2) 試験処理

窒素処理では、慣行の窒素施肥量がポット当たり0.84~0.98gN/ポットであることから、標準窒素施肥量を0.84gとし、基肥窒素量0.42, 0.84, 1.26, 1.68g区の処理を設けた。さらに、ケイ酸無施用区、ポット当たりケイ酸基肥7.5g区、15g区を設けて窒素施肥処理と組み合わせ、3反復で処理した。ケイ酸施用量は、ポット試験で慣行的に行ってきた圃場の倍量施肥を基に設定した。肥料には高度化成444(セントラル合同肥料)を用いており、リン酸およびカリウムに関しては、窒素と等量を施用した。ケイ酸の施用にはシリカゲルを用いた。肥料およびシリカゲルを碎土した土壌に混和した後、ポットに充填、水道水を添加して代かきを行った。ポットは7月17日~7月26日に人工気象室内で温度処理(日中22℃-夜間18℃)を行い、それ以外の期間は屋外で管理した。人工気象室内の温度処理は、同時期の平年値に対して平均気温で1.5℃、最高気温で4℃程度低く設定した。

## 3) 調査及び分析方法

止葉期茎葉の分析や葯長の測定方法は圃場試験に準じる。ただし株数が少ないため、各ポットから止葉期に茎葉サンプルを1株採取し、出穂始めに別の株から3穂を抜き取り葯長調査に使用し、不稔調査は残りの1株を用いた。

## 実験結果

## 1) 生育概況

1998年の気象は6月上～中旬、7月中～下旬の気温が低めであるものの、概ね平年並みに推移していた。日照は8月に寡少であったが、登熟に大きな影響を与える程度ではなかった。試験1（圃場試験）の生育期節は幼穂形成期7月2日、止葉期7月24日、出穂期8月3日、成熟期9月16日であり、平年と大差なかった。試験2（ポット試験）の場合、幼穂形成期7月1日、

止葉期7月23日、出穂期8月3日、成熟期9月17日であった。

## 2) 窒素・ケイ酸施用と不稔歩合の関係

試験1の各処理が、不稔歩合と稲体栄養に及ぼす影響を表36に示した。不稔歩合は窒素施肥量の増加とともに高まり、各窒素施肥量はケイ酸無施用区>ケイ酸基肥区>ケイ酸追肥区の順で高かった。また、窒素施肥量の増加とともに止葉期の茎部および葉身部の窒素含有量は増加し、葉身部のケイ酸含有量は減少する傾向にあった。各窒素施肥量では、ケイ酸施用により止葉期の茎部および葉身部のケイ酸含有量が増加し、反対に窒素含有量は減少する傾向にあった。ケイ酸の基肥と追肥は、統計的には有意でないが、ケイ酸含有量がケイ酸基肥区で高くなり、窒素含有量はケイ酸追肥区で最も低下した。茎葉のケイ酸/窒素比はケイ酸施

表36. 窒素・ケイ酸施用が不稔歩合および止葉期の窒素・ケイ酸含有量に及ぼす影響

窒素 施肥処理	ケイ酸 施肥処理	不稔歩合 %	窒素含有量		ケイ酸含有量		茎葉 ケイ酸/窒素 比
			茎部 g kg <sup>-1</sup>	葉身部 g kg <sup>-1</sup>	茎部 g kg <sup>-1</sup>	葉身部 g kg <sup>-1</sup>	
基肥6	ケイ酸無施用区	11.2 a	7.8 a	23.1 a	40.2 a	68.0 a	3.93 a
基肥6	ケイ酸基肥区	9.5 a	7.7 a	22.9 a	45.9 a	87.8 a	4.79 a
基肥6	ケイ酸追肥区	6.9 a	7.2 a	22.0 a	44.2 a	81.9 a	4.71 a
基肥9	ケイ酸無施用区	15.3 a	8.4 a	25.7 a	39.0 a	58.3 a	3.20 a
基肥9	ケイ酸基肥区	12.9 ab	8.1 a	24.5 a	47.5 b	82.1 b	4.30 a
基肥9	ケイ酸追肥区	7.5 b	7.6 a	23.3 a	41.4 ab	75.9 ab	4.11 a
基肥12	ケイ酸無施用区	21.1 a	8.6 a	26.2 a	40.2 a	55.9 a	3.08 a
基肥12	ケイ酸基肥区	16.9 b	8.7 a	26.8 a	45.6 a	71.2 a	3.63 a
基肥12	ケイ酸追肥区	14.1 b	7.9 a	24.6 a	43.2 a	74.0 a	3.93 a
基9+追3	ケイ酸無施用区	30.4 a	10.5 a	32.7 a	39.6 a	54.0 a	2.38 a
基9+追3	ケイ酸基肥区	21.0 b	10.1 a	29.8 a	48.1 b	76.1 a	3.36 a
基9+追3	ケイ酸追肥区	17.2 b	9.6 a	28.7 a	44.9 ab	68.3 a	3.23 a

各窒素施肥量における異なる英小文字は、Tukey-Kramer testにより5%水準で有意差があることを示す。(n=2)

表37. 窒素・ケイ酸施用が稲体の窒素・ケイ酸吸収量に及ぼす影響

窒素 施肥処理	ケイ酸施肥処理	止葉期(A)		成熟期(B)		止葉期～成熟期(B-A)	
		窒素吸収量 g m <sup>-2</sup>	ケイ酸吸収量 g m <sup>-2</sup>	総窒素吸収量 g m <sup>-2</sup>	総ケイ酸吸収量 g m <sup>-2</sup>	窒素吸収量 g m <sup>-2</sup>	ケイ酸吸収量 g m <sup>-2</sup>
基肥6	ケイ酸無施用区	5.7 a	22.1 a	7.1 a	60.9 a	1.4 a	38.8 a
基肥6	ケイ酸基肥区	6.0 a	27.6 a	7.8 a	68.5 a	1.8 a	40.9 a
基肥6	ケイ酸追肥区	5.3 a	24.8 a	7.0 a	67.8 a	1.7 a	42.9 a
基肥9	ケイ酸無施用区	7.0 a	22.3 a	8.1 a	59.0 a	1.1 a	36.7 a
基肥9	ケイ酸基肥区	7.8 a	33.3 b	9.3 a	81.5 b	1.5 a	48.2 a
基肥9	ケイ酸追肥区	6.5 a	26.7 ab	8.8 a	80.2 b	2.3 a	53.5 a
基肥12	ケイ酸無施用区	8.3 a	25.4 a	9.3 a	63.1 a	1.0 a	37.6 a
基肥12	ケイ酸基肥区	9.3 a	33.5 b	10.4 a	85.2 b	1.1 a	51.6 a
基肥12	ケイ酸追肥区	8.0 a	31.2 ab	10.5 a	85.8 b	2.5 a	54.6 a
基9+追3	ケイ酸無施用区	10.8 a	25.4 a	11.1 a	63.0 a	0.4 a	37.6 a
基9+追3	ケイ酸基肥区	11.6 a	38.6 b	12.4 a	91.2 b	0.8 a	52.6 a
基9+追3	ケイ酸追肥区	9.3 a	30.0 a	12.1 a	82.3 b	2.8 a	52.2 a

各窒素施肥量における異なる英小文字は、Tukey-Kramer testにより5%水準で有意差があることを示す。(n=2)

表38. 窒素・ケイ酸施肥量が不稔歩合および止葉期の窒素・ケイ酸・炭水化物含有量に及ぼす影響

窒素 施肥量 g/pot	ケイ酸 施肥量 g/pot	不稔歩合 %	出穂始め 葯の長さ mm	窒素含有量		ケイ酸含有量		茎葉 ケイ酸/窒素 比	基部 炭水化物 含有量 g kg <sup>-1</sup>
				基部	葉身部	基部	葉身部		
0.42	0	29.5 a	—	8.2 a	22.7 a	41.9 a	50.3 a	3.71 a	205 a
0.42	7.5	25.7 a	—	7.1 a	22.3 a	57.7 b	91.8 b	6.50 b	217 a
0.42	15.0	26.5 a	—	7.8 a	23.6 a	70.7 b	99.7 b	6.51 b	225 a
0.84	0	62.0 a	1.47 a	11.0 a	29.6 a	35.7 a	36.1 a	2.17 a	157 a
0.84	7.5	57.4 a	—	9.8 a	29.6 a	45.8 ab	71.5 b	3.48 b	169 a
0.84	15.0	51.0 a	1.59 a	9.4 a	27.3 a	52.3 b	69.7 b	4.01 b	181 a
1.26	0	85.8 a	1.38 a	13.9 a	35.9 a	34.6 a	34.4 a	1.67 a	138 a
1.26	7.5	78.6 ab	—	14.3 a	36.3 a	42.9 a	51.9 a	2.11 ab	145 a
1.26	15.0	65.8 b	1.48 a	13.0 a	35.0 a	45.6 a	59.1 a	2.52 b	162 a
1.68	0	91.8 a	—	18.6 a	42.8 a	30.9 a	35.3 a	1.21 a	128 a
1.68	7.5	85.5 ab	—	16.2 a	40.1 a	36.9 ab	40.9 a	1.60 a	134 a
1.68	15.0	77.8 b	—	19.7 a	40.9 a	45.7 b	53.3 a	1.78 a	138 a

各窒素施肥量における異なる英小文字は、Tukey-Kramer testにより5%水準で有意差があることを示す。(n=3)

用で高まったが、基肥と追肥の比較では判然としなかった。

止葉期の窒素吸収量は窒素施肥量の増加に伴って高まり、各窒素施肥量における比較では統計的に有意でないが、ケイ酸基肥区>ケイ酸無施用区>ケイ酸追肥区の順で高かった(表37)。止葉期のケイ酸吸収量はケイ酸基肥区>ケイ酸追肥区>ケイ酸無施用区の順であった。成熟期の各窒素施肥量における総窒素吸収量および総ケイ酸吸収量はケイ酸基肥区が最も高く、ケイ酸無施用区が低かった(表37)。差し引きによる止葉期~成熟期の窒素吸収量およびケイ酸吸収量を見ると、ケイ酸追肥区がケイ酸基肥区より勝る傾向にあった。

試験2では試験1と比較して全体に不稔歩合が高かった。不稔歩合は、試験1と同様に窒素施肥量の増加とともに高まり、各窒素施肥量に設定されているケイ酸処理区ではケイ酸無施用区>ケイ酸7.5g区>ケイ酸15.0g区の順で高かった(表38)。また、窒素施肥量の増加とともに止葉期の基部および葉身部の窒素含有量は増加し、基部および葉身部のケイ酸含有量は減少する傾向にあった。その結果、止葉期における茎葉のケイ酸/窒素比は、窒素施肥量の増加にもなって低下した。窒素含有量に対するケイ酸施肥量の影響に統計的な有意性が認められなかったが、ケイ酸施用の増加に伴い、基部および葉身部のケイ酸含有量、茎葉のケイ酸/窒素比の平均値は増加する傾向にあった。

3) 稲体の窒素・ケイ酸成分と炭水化物含有量の関係

試験1の結果から、具体的に各処理が炭水化物含有量に及ぼす影響を比較した(図38)。炭水化物にはリグニンやセルロースなど植物細胞壁構成成分となるも

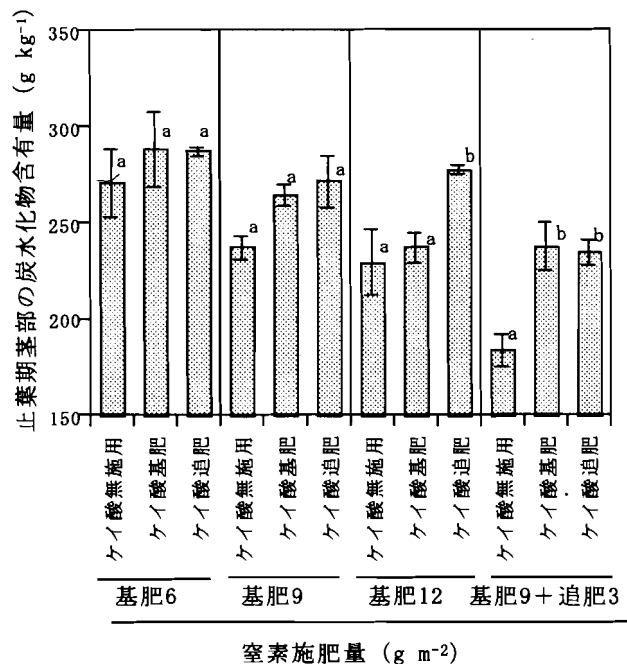
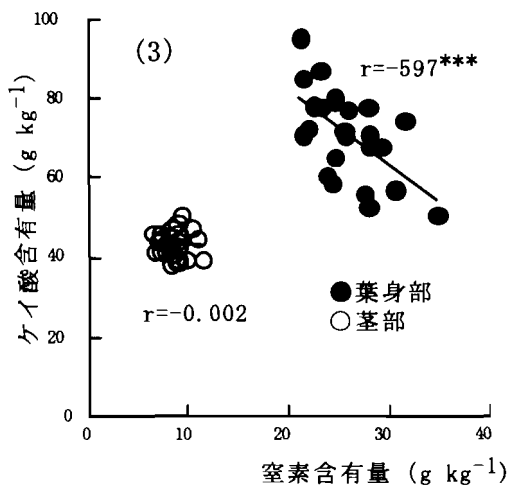
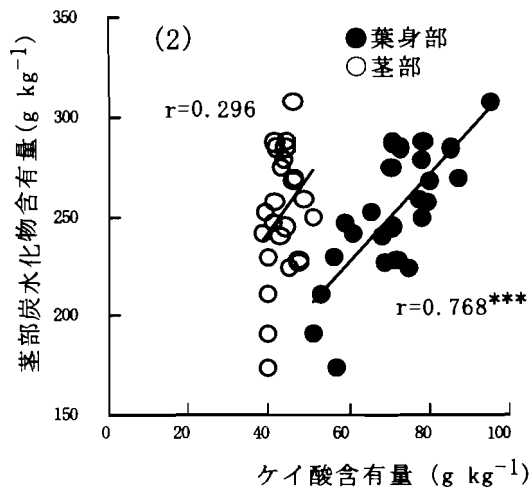
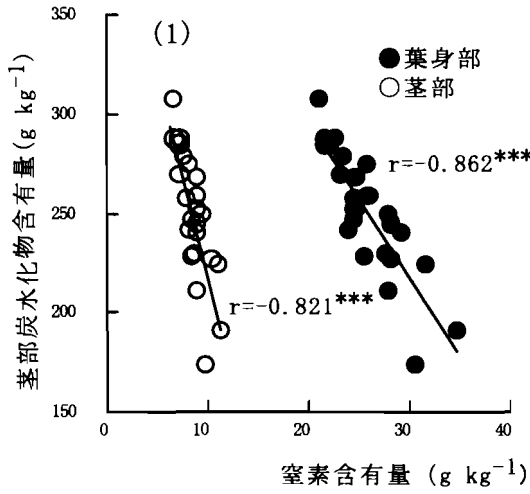


図38. 窒素・ケイ酸用量が茎炭水化物含有率に及ぼす影響  
炭水化物含有量はGlucose換算、図中の垂線は標準誤差を示す。各窒素施肥量における異なる英小文字は、Tukey-Kramer testにより5%水準で有意差があることを示す。(n=2)

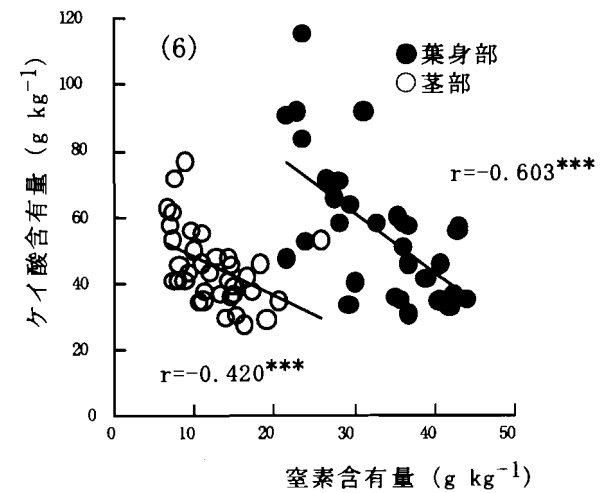
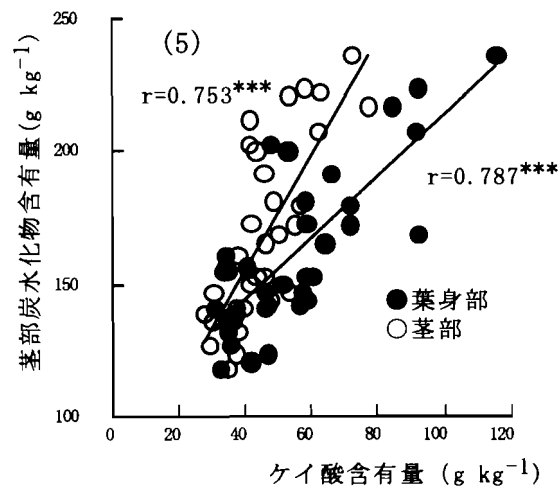
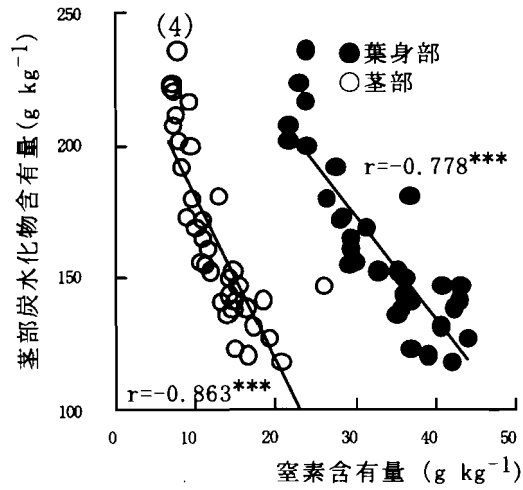
のも含まれているが、ここではデンプンや糖など狭義の炭水化物を対象とした。止葉期基部の炭水化物含有量は窒素施肥量の増加に伴って低下し、各窒素施肥量ではケイ酸追肥区≧ケイ酸基肥区>ケイ酸無施用区の順で高かった。試験2でも、統計的に有意ではないが、ケイ酸を施用した区で止葉期基部の炭水化物含有量が高い傾向にあった(表38)。

止葉期における基部の炭水化物含有量と葉身部および基部の窒素含有量、ケイ酸含有量の相関関係を図39

1) 試験1



2) 試験2



n=24, \*\*\*は1%水準で有意な関係を示す

n=36, \*\*\*は1%水準で有意な関係を示す

図39. 止葉期の茎部炭水化物含有量と葉身部および茎部の窒素・ケイ酸含有量の関係

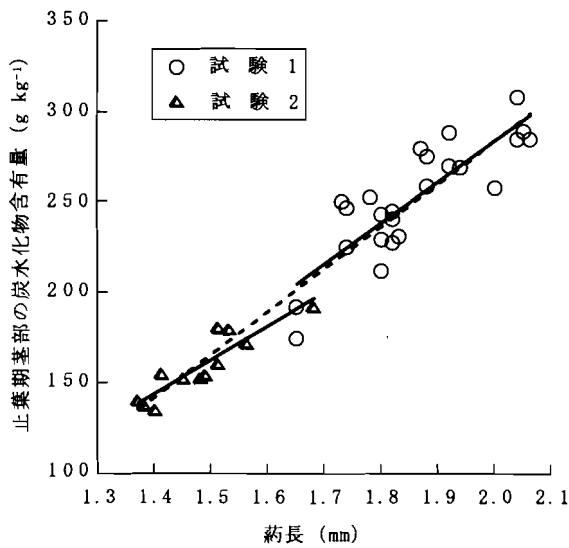


図40. 止葉期の茎部の炭水化物含有率と葯長の関係  
 実線は各試験の回帰曲線, 破線は試験1と試験2を含めた回帰曲線  
 炭水化物含有量はGlucose換算  
 試験1:  $Y = 227X - 171$   $r = 0.851$   $n = 24$   
 試験2:  $Y = 184X - 113$   $r = 0.899$   $n = 12$   
 試験1と2:  $Y = 237X - 189$   $r = 0.959$   $n = 36$

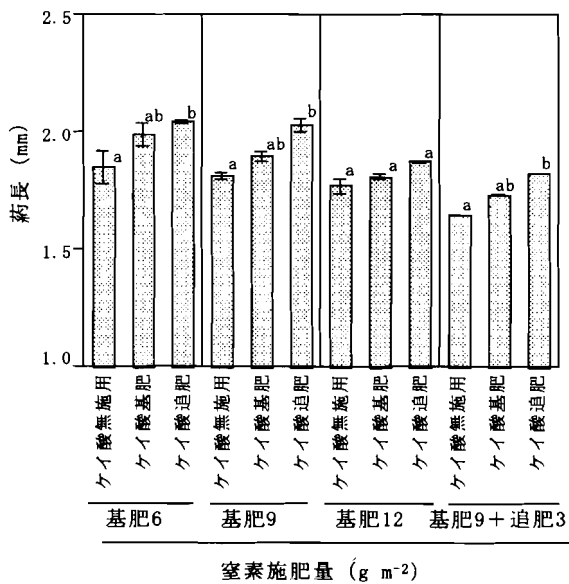


図41. 窒素・ケイ酸用量が葯長に及ぼす影響  
 図中の垂線は標準誤差を示す。  
 各窒素施肥量における異なる英小文字は, Tukey-Kramer test  
 により5%水準で有意差があることを示す。(n=2)

に示した。試験1の茎部の炭水化物含有量と葉身部および茎部の窒素含有量には負の相関関係, 葉身部のケイ酸含有量には正の相関関係が認められた。また, 葉身の窒素含有量とケイ酸含有量の間には, 負の相関関係が認められた。試験2もほぼ同様の関係にあったが, 試験2では茎部炭水化物含有量と茎部のケイ酸含有量の間, 茎部の窒素含有量とケイ酸含有量の間についても正の相関関係が認められた。試験1と試験2を比較

すると, 試験処理による窒素含有量とケイ酸含有量の変動幅は試験2が, 茎部の炭水化物含有量の変動幅は試験1が大きかった。

4) 炭水化物含有量と葯長

出穂始め葯長と止葉期茎部の炭水化物含有量の関係を検討した(図40)。その結果, 止葉期茎部の炭水化物含有量は, 試験1が178g kg<sup>-1</sup>から308g kg<sup>-1</sup>に分布し, 試験2が136g kg<sup>-1</sup>から192g kg<sup>-1</sup>に分布した。葯長(X), 止葉期茎部の炭水化物含有量(Y)として一次関数を当てはめると試験1が $Y = 227X - 171$ ,  $r = 0.851$ ,  $n = 24$ であり, 試験2が $Y = 184X - 113$ ,  $r = 0.899$ ,  $n = 12$ となった。さらに, 試験1と試験2を含めた場合には $Y = 237X - 189$ ,  $r = 0.959$ ,  $n = 36$ となり, ほぼ同一の回帰直線で説明される有意な正の相関関係が認められた。

5) 不稔歩合と葯長

試験1の各処理における出穂始めの葯長を比較したところ, 葯長は基肥窒素量の増加とともに縮小し, 特に基肥9+追肥3g m<sup>-2</sup>区で最も短かった(図41)。ケイ酸施用と葯長の関係から見ると, ケイ酸追肥区>ケイ酸基肥区>ケイ酸無施用区の順で長く, この傾向は窒素施肥量に関わりなく共通して認められた。試験2でも, 統計的に有意ではないが, ケイ酸15g区の葯長が無施用区より長かった(表38)。

次に試験1, 試験2の出穂始め葯長と不稔歩合の関係を図42に示した。試験1の葯長は1.65mmから2.06mmに分布し, 不稔歩合は5.9%から30.7%に分布した。

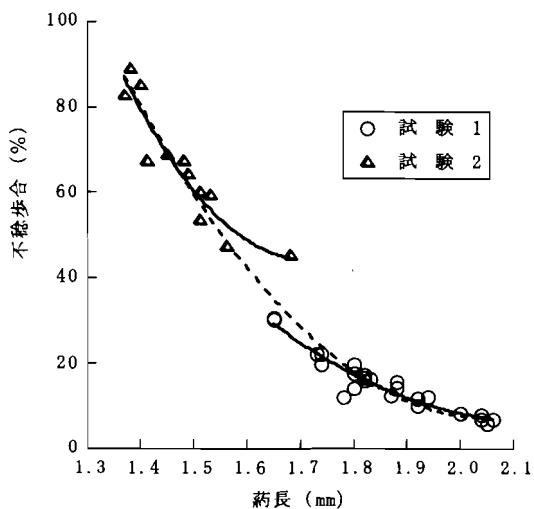


図42. 出穂始めの葯長と不稔歩合の関係  
 実線は各試験の回帰曲線, 破線は試験1と試験2を含めた回帰曲線  
 試験1:  $Y = 94.3X - 404X^2 + 439$   $r = 0.956$   $n = 24$   
 試験2:  $Y = 369X - 1263X^2 + 1123$   $r = 0.941$   $n = 12$   
 試験1と2:  $Y = 174X - 712X^2 + 737$   $r = 0.987$   $n = 36$

表39. 窒素・ケイ酸施肥が収量および品質に及ぼす影響

窒素 施肥処理	ケイ酸 施肥処理	1穂 穂数 粒	穂数 本 m <sup>2</sup>	総粒数 ×千粒 m <sup>2</sup>	千粒重 g	登熟 歩合 %	精玄米 収量 g m <sup>2</sup>	白米 タンパク質 含有量 g kg <sup>-1</sup>	玄米 白度	良質粒 歩合 %
基肥6	ケイ酸無施用区	41.6 a	664 a	27.8 a	22.5	81.6 a	504 a	59.2 a	17.6	94.3
基肥6	ケイ酸基肥区	48.2 a	701 a	33.8 a	22.4	75.6 a	570 b	57.9 a	17.0	94.5
基肥6	ケイ酸追肥区	51.1 a	638 a	32.4 a	22.4	78.2 a	568 b	55.0 a	18.2	97.0
基肥9	ケイ酸無施用区	43.4 a	795 a	34.5 a	22.3	77.6 a	598 a	62.3 a	17.3	93.5
基肥9	ケイ酸基肥区	45.5 a	852 a	38.7 a	21.9	75.3 a	634 a	58.0 a	17.2	89.9
基肥9	ケイ酸追肥区	49.8 a	799 a	39.7 a	22.2	74.2 a	643 a	56.0 a	17.7	94.3
基肥12	ケイ酸無施用区	47.0 a	850 a	39.8 a	22.0	73.6 a	618 a	63.9 a	16.7	86.1
基肥12	ケイ酸基肥区	47.5 a	893 a	42.4 a	21.7	74.5 a	685 a	63.6 a	16.7	87.7
基肥12	ケイ酸追肥区	50.6 a	847 a	42.9 a	21.7	73.5 a	679 a	58.9 a	17.3	93.2
基9+追3	ケイ酸無施用区	49.3 a	956 a	46.6 a	22.1	62.5 a	641 a	65.2 a	16.5	84.3
基9+追3	ケイ酸基肥区	50.0 a	972 a	48.3 a	21.7	65.3 a	685 ab	65.2 a	16.3	86.0
基9+追3	ケイ酸追肥区	52.4 a	950 a	49.7 a	22.0	65.9 a	695 b	60.6 a	16.7	87.1

精玄米収量には、篩目19mmを使用した。玄米白度と良質粒歩合の測定には精玄米を用いた。各窒素施肥量における異なる英小文字は、Tukey-Kramer testにより5%水準で有意差があることを示す。(n=2)

葯長と不稔歩合について、葯長(x), 不稔歩合(y)として二次関数を当てはめると  $Y=94.3X^2-403X+439$ ,  $r=0.956$ ,  $n=24$ であり、危険率0.1%未満の有意な負の相関関係が認められた。また、試験2ではポット当たり窒素0.84g区と1.26g区における、ケイ酸無施用およびケイ酸基肥15g区でのみ葯長を測定した。葯長は1.37mmから1.68mmに分布し、不稔歩合は45.4%から89.2%に分布した。葯長(X), 不稔歩合(Y)として二次関数を当てはめると  $Y=369X^2-1263X+1123$ ,  $r=0.941$ ,  $n=12$ であり、危険率0.1%未満の有意な負の相関関係が認められた。さらに、試験1と試験2を含めた場合には、 $Y=174X^2-712X+737$ ,  $r=0.987$ ,  $n=36$ となり、ほぼ同一の回帰曲線で説明できた。

6) 収量および産米品質

精玄米収量は窒素施肥量の増加に伴って高まり、各窒素施肥量における比較ではケイ酸基肥区≒ケイ酸追肥区>ケイ酸無施用区となった(表39)。ケイ酸追肥区は無施用区と比較して主に1穂穂数と総粒数が高まり、ケイ酸基肥区では主に穂数と総粒数が高まる傾向にあった。ただし、これらは統計的に有意な差でなかった。成熟期の茎葉ケイ酸/窒素比と窒素玄米生産効率には正比例の関係が認められた(図43)

白米タンパク質含有量は窒素施肥量の増加に伴って高まり、反対に玄米白度と良質粒歩合は低下した(表39)。ケイ酸施肥が産米品質に及ぼす影響を見ると、白米タンパク質含有量はケイ酸無施用区≧ケイ酸基肥区>ケイ酸追肥区であった。玄米白度および良質粒歩合はケイ酸追肥区>ケイ酸基肥区≒ケイ酸無施用区と

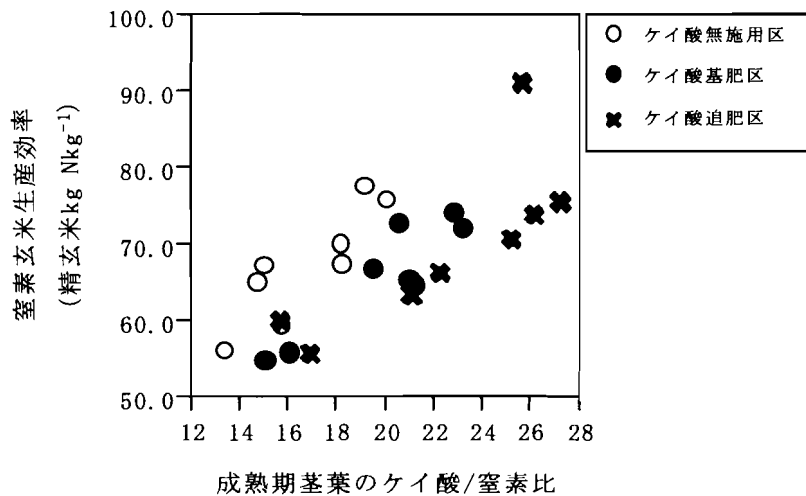


図43. 成熟期の茎葉ケイ酸/窒素比と窒素玄米生産効率の関係

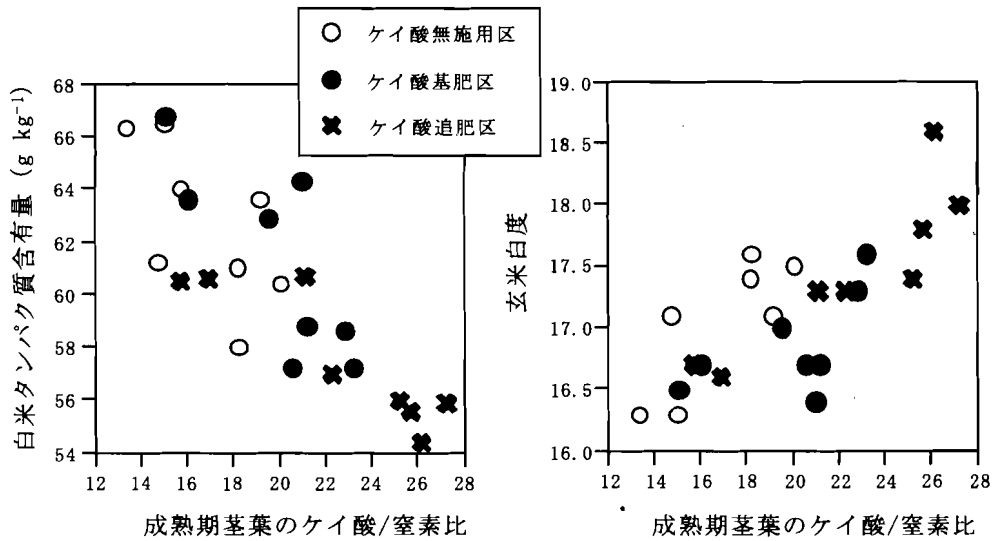


図44. 成熟期の茎葉ケイ酸/窒素比と白米タンパク質含有量および玄米白度の関係

なった。また、成熟期の茎葉ケイ酸/窒素比と白米タンパク質含有率には負の相関関係が、玄米白度には正の相関関係が認められた(図44)。

5-2-2 ケイ酸資材施用が産米品質に及ぼす影響試験1(培養実験)

実験方法

1) 供試土壌：1998年耕起前、上川農業試験場水田圃場(細粒褐色低地土)の作土(深さ0~15cm)から採取した土壌を風乾砕土後、2mmのメッシュで篩い、常温保存したものを実験に供した。

2) 培養条件：風乾土15gをポリビン100ml容に充填し、各ケイ酸質肥料を50mg施用した後、脱塩水70mlを加し、20℃で5週間恒温培養した。培養期間を通じて、土壌表面を濾紙で覆い、上澄み水を1週間毎に採取して、分析に供した。減少した分の水分は脱塩水を添加して培養を継続した。試験は3反復で行った。

3) 処理内容：土壌のみ(無施用)の場合を対照区とし、土壌表面施用(シリカゲルおよびケイ酸カルシウム、ケイ酸カリウム、熔成磷肥)、土壌混合施用(ケイ酸カルシウム、熔成磷肥)を設けた。ケイ酸質肥料の保証成分はケイ酸カルシウム(可溶性ケイ酸30%、アルカリ分45%、く溶性苦土1%)、ケイ酸カリウム(可溶性ケイ酸30%)、熔成磷肥(可溶性ケイ酸20%)であった。各肥料は1mmメッシュで篩ったものを用いた。

4) 分析項目：ケイ酸含有量、pH、アンモニア態窒素量

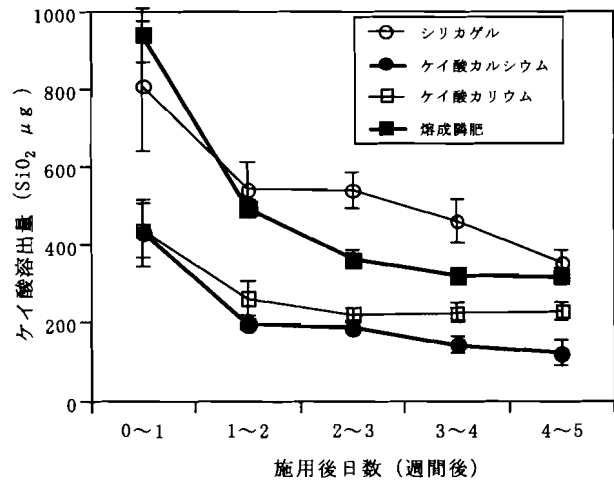


図45. 表面施用における各種ケイ酸質肥料からのケイ酸溶出量  
100mlポリ瓶を用い、各ケイ酸質肥料は現物50mgを土壌15gに施用し、20℃で培養した。  
無施用における土壌由来のケイ酸溶出量を差し引いた値。

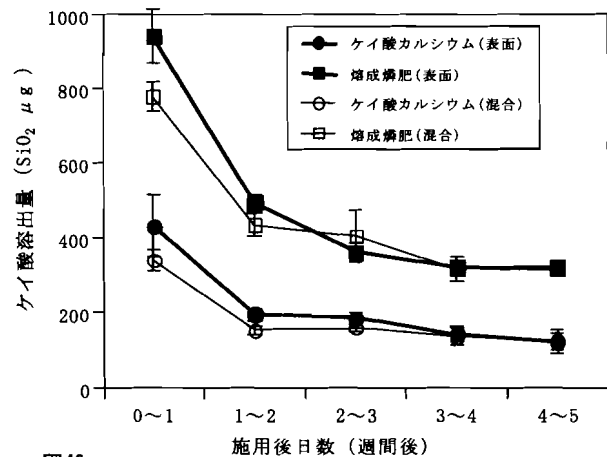


図46. ケイ酸質肥料からのケイ酸溶出量に及ぼす施用条件の影響  
表面：土壌表面に散布、混合：土壌と混合



表40. 培養液のpHとアンモニア態窒素およびケイ酸の溶出

資材名	ケイ酸 施用量 mg	培養液のpH				アンモニア態窒素量(μg)				総ケイ酸* 溶出量 μg	資材由来 のケイ酸 溶出率* %
		0~1週	1~2週	2~3週	3~4週	0~1週	1~2週	2~3週	3~4週		
無施用	—	7.8	7.7	7.2	6.9	204	82	37	23	2242	—
シリカゲル	50	7.6	7.5	6.9	6.7	209	43	52	7	4882	5.3
肥料A	15	7.9	8.0	7.5	7.0	294	105	81	32	3254	6.7
肥料B	15	8.0	8.0	7.6	7.2	322	119	70	40	3551	8.7
肥料C	10	8.2	8.2	8.0	7.4	279	136	123	53	4611	23.7

各ケイ酸質肥料は現物で50mg施用した。

\*) 総ケイ酸溶出量と資材由来のケイ酸溶出率は0~5週間の累積で算出した。

### 実験結果

培養によるケイ酸溶出試験は、土壌表面に散布したケイ酸質肥料からの溶出は施用直後に最も多く、その後次第に少なくなる傾向にあった(図45)。表面施用と土壌混和条件の比較では、明瞭な差が認められなかった(図46)。総ケイ酸溶出量は、シリカゲル>熔成燐肥>ケイ酸カリウム>ケイ酸カルシウムの順であった(表40)。培養液のpHは培養日数に伴って、低下したが、肥料添加処理で高く推移した。アンモニア態窒素濃度は、肥料添加によって高まり、熔成燐肥>ケイ酸カリウム≧ケイ酸カルシウム>シリカゲルの順であった。

### 試験2(圃場試験)

#### 実験方法

##### 1) 供試圃場および栽培概要

試験は1996年~1998年に上川農業試験場水田で実施した。土壌条件および供試品種等は5-2-1, 試験1に準じた。

##### 2) 試験処理

施肥は、1996~1997年が窒素(N)-リン酸(P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>)-カリウム(K<sub>2</sub>O)を12-12-12g m<sup>-2</sup>, 1998年が窒素-リン酸-カリウムを10-10-10g m<sup>-2</sup>, 高度化成444で全量全層施肥した。ケイ酸質肥料の追肥処理は、幼穂形成期および幼穂形成期後7日目で行った。ケイ酸質肥料は試験1で用いたケイ酸カルシウム, ケイ酸カリウム, 熔成燐肥の他に液体状ケイ酸カリウム(以下は液体ケイ酸, 可溶性ケイ酸28%)施用量は、1996年で50g m<sup>-2</sup>, 1997年で40(液体ケイ酸のみ20)g m<sup>-2</sup>, 1998年で20, 40(液体ケイ酸のみ10, 20)g m<sup>-2</sup>, 2反復(1997年は3反復)で処理した。基肥は耕起後に施用し、施用後に深さ12~13cmで砕土・混和した。追肥は幼穂形成期に落水し、表面施用で行った。全試験区とも幼穂形成期~出穂期の期間は田面水深1cm以下の浅水で

管理した。

また、1998年はケイ酸カルシウム, ケイ酸カリウム, 熔成燐肥の基肥施用を比較のために設置した。基肥施用量は各肥料現物で150g m<sup>-2</sup>施用した。

##### 3) 調査分析方法

5-2-1, 試験1に準じた。

### 実験結果

#### 1) 生育概況

1996年の気象は、5月上~中旬の気温が低めであったが、6月中旬の高温で生育はやや回復した。その後8月~9月上旬の低温・寡照により登熟は停滞した。1997年の気象も、5月上~6月上旬の気温が低かったため、分けつの発生は停滞したが、6月中旬以降の高温で生育は回復し、出穂・開花も順調であった。しかし、8月以降は一転して低温・寡照となり、1996年同様に登熟は停滞した。具体的な生育期節は、1996年が幼穂形成期7月3日, 止葉期7月22日, 出穂期8月1日, 成熟期9月27日であり、成熟期は平年より遅かった。1997年が幼穂形成期7月4日, 止葉期7月19日, 出穂期7月28日, 成熟期9月27日であり、成熟期は平年より遅かった。1998年は、5-2-1の試験1で述べたように、平年並みであった。

#### 2) ケイ酸質肥料の追肥が稲体栄養に及ぼす影響

ケイ酸質肥料の追肥により、止葉期における茎葉のケイ酸含有量および吸収量は高まる傾向にあり、窒素含有量は同等もしくは低下する傾向を示した(表41)。このため、茎葉のケイ酸/窒素比はケイ酸質肥料の追肥により、全ての肥料で概ね上昇した。肥料間の比較では、年次により傾向が異なり、その差は判然としなかった。1998年における、追肥と基肥処理の比較では、止葉期茎葉の成分について一定の傾向が得られなかった。止葉期基部炭水化物含有量は、ケイ酸質肥料の追

表41. ケイ酸質肥料の施用が止葉期の窒素・ケイ酸吸収に及ぼす影響

試験年次	ケイ酸質肥料	施用時期	施用量 g m <sup>-2</sup>	出穂始め 約長 mm	止葉期茎葉の				止葉期 茎葉の ケイ酸/ 窒素比
					窒素 含有量 g kg <sup>-1</sup>	窒素 吸収量 g m <sup>-2</sup>	ケイ酸 含有量 g kg <sup>-1</sup>	ケイ酸 吸収量 g m <sup>-2</sup>	
1996	無施用	—	—	—	20	9.8	56	28	2.9
	ケイ酸カリウム	1W	50	—	22	10.0	56	25	2.5
	熔成燐肥	1W	50	—	17	8.5	52	26	3.0
1997	無施用	—	—	—	19	9.7	56	29	3.0
	ケイ酸カルシウム	1W	40	—	17	10.8	61	39	3.7
	ケイ酸カリウム	0W	40	—	19	11.7	56	34	3.1
	ケイ酸カリウム	1W	40	—	17	8.9	62	33	3.7
	熔成燐肥	0W	40	—	18	11.1	59	36	3.4
	溶成燐肥	1W	40	—	18	10.9	63	38	3.4
	液体ケイ酸	0W	20	—	19	11.4	57	35	3.2
	液体ケイ酸	1W	20	—	17	9.6	58	34	3.6
1998	無施用	—	—	1.73	15	7.6	51	27	3.6
	ケイ酸カルシウム	0W	20	1.87	15	7.3	55	28	3.8
	ケイ酸カルシウム	1W	20	1.89	15	8.7	53	32	3.8
	ケイ酸カルシウム	0W	40	2.08	14	7.4	58	30	4.1
	ケイ酸カルシウム	1W	40	1.93	13	7.9	54	34	4.4
	ケイ酸カリウム	0W	20	1.91	14	8.3	57	35	4.3
	ケイ酸カリウム	1W	20	1.93	14	8.2	56	33	4.0
	ケイ酸カリウム	0W	40	1.90	13	7.7	53	31	4.1
	ケイ酸カリウム	1W	40	1.96	14	7.9	53	30	3.8
	熔成燐肥	0W	20	1.80	12	6.3	60	31	4.9
	熔成燐肥	1W	20	1.93	15	9.3	56	36	4.0
	熔成燐肥	0W	40	1.93	13	6.9	53	28	4.0
	熔成燐肥	1W	40	2.01	14	9.0	55	37	4.2
	液体ケイ酸	0W	10	1.94	15	7.9	58	32	4.2
	液体ケイ酸	1W	10	1.79	14	8.8	60	37	4.2
	液体ケイ酸	0W	20	1.87	13	8.9	52	36	4.1
	液体ケイ酸	1W	20	2.01	12	7.5	59	37	4.9
	ケイ酸カルシウム	基肥	150	1.84	14	7.6	58	31	4.3
	ケイ酸カリウム	基肥	150	1.90	15	8.4	59	33	4.0
	熔成燐肥	基肥	150	1.77	13	7.4	61	35	4.6

施用時期は、0W：幼穂形成期、1W：幼穂形成期後7日目

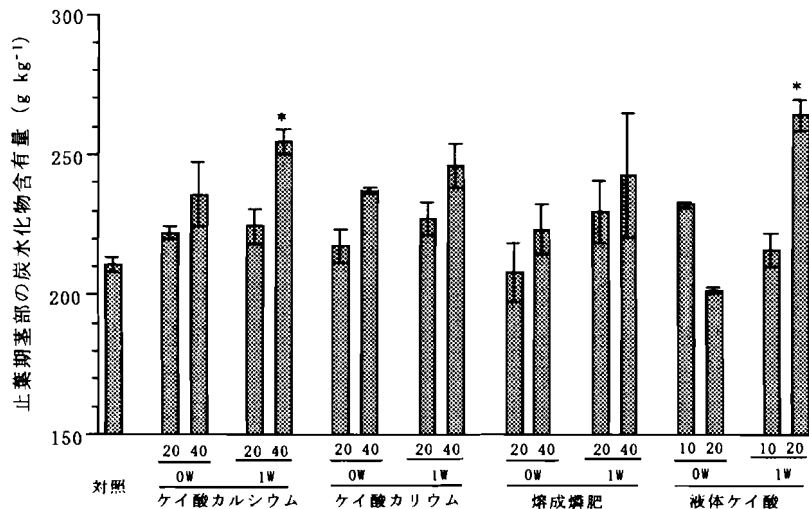


図47. ケイ酸質肥料の追肥が止葉期の茎部の炭水化物含有量に及ぼす影響 (1998年)

施用時期は、0W：幼穂形成期、1W：幼穂形成期後7日目 図中の垂線は標準誤差を示す

\*) Dunnettの検定により、対照区に対して5%水準の有意差が認められた処理

肥により概ね増加しており、液体ケイ酸を除いて幼穂形成期後7日目追肥>幼穂形成期追肥、施用量 $40\text{ g m}^{-2}>20\text{ g m}^{-2}$ の順であった(図47)。出穂始めの葍長もケイ酸質肥料の追肥により概ね増加していたが、追肥時期および追肥量が及ぼす影響は、止葉期茎部炭水化合物含有量ほど明瞭でなかった。また、葍長に関して追肥と基肥に効果を見ると、追肥処理で葍長が長い傾向が認められた。

成熟期の茎葉ケイ酸含有量は、ケイ酸質肥料追肥により概ね高まる傾向にあったが、幼穂形成期追肥では低下する事例もあった(表42)。ケイ酸吸収量は追肥で概ね高まったが、追肥時期や追肥量の影響は一定で

なかった。窒素含有量は追肥で低下する傾向にあったが、窒素吸収量については判然としなかった。ケイ酸質肥料の基肥処理では、ケイ酸含有量が高まると同時に、窒素含有量および吸収量も増加した。成熟期茎葉のケイ酸/窒素比は、ケイ酸質肥料の追肥で高まる傾向を示したが、肥料の種類、追肥量の影響は判然としなかった。追肥時期に関しては、幼穂形成期後7日目追肥のケイ酸/窒素比が、幼穂形成期追肥のケイ酸/窒素比を上回る事例が多かった。

### 3) 不稔発生および収量・品質

不稔歩合は、3カ年を通じてケイ酸質肥料の追肥で低下する傾向にあった(表43)。追肥時期の比較では、

表42. ケイ酸質肥料の施用が成熟期の窒素・ケイ酸吸収に及ぼす影響

試験年次	ケイ酸質肥料	施用時期	施用量 $\text{g m}^{-2}$	成熟期茎葉の				成熟期茎葉の ケイ酸/ 窒素比	総窒素 吸収量 $\text{g m}^{-2}$	総ケイ酸 吸収量 $\text{g m}^{-2}$
				窒素 含有量 $\text{g kg}^{-1}$	窒素 吸収量 $\text{g m}^{-2}$	ケイ酸 含有量 $\text{g kg}^{-1}$	ケイ酸 吸収量 $\text{g m}^{-2}$			
1996	無施用	—	—	6.7	4.0	—	—	—	11.3	—
	ケイ酸カリウム	1W	50	7.0	4.0	—	—	—	11.2	—
	熔成燐肥	1W	50	6.7	4.0	—	—	—	11.9	—
1997	無施用	—	—	9.9	5.3	—	—	—	13.5	—
	ケイ酸カルシウム	1W	40	7.9	4.5	—	—	—	12.1	—
	ケイ酸カリウム	0W	40	9.1	5.4	—	—	—	13.6	—
	ケイ酸カリウム	1W	40	7.7	4.5	—	—	—	12.4	—
	熔成燐肥	0W	40	7.7	4.0	—	—	—	11.1	—
	溶成燐肥	1W	40	9.5	5.8	—	—	—	14.5	—
	液体ケイ酸	0W	20	8.8	5.2	—	—	—	13.2	—
液体ケイ酸	1W	20	7.9	4.7	—	—	—	12.4	—	
1998	無施用	—	—	5.4	2.8	95	50	18	11.1	81
	ケイ酸カルシウム	0W	20	5.3	3.0	93	53	18	9.5	83
	ケイ酸カルシウム	1W	20	4.7	2.4	98	50	21	9.1	75
	ケイ酸カルシウム	0W	40	4.9	2.6	101	54	21	9.6	88
	ケイ酸カルシウム	1W	40	4.8	2.6	102	55	21	10.0	83
	ケイ酸カリウム	0W	20	4.7	2.6	97	55	21	9.9	89
	ケイ酸カリウム	1W	20	5.1	2.7	108	58	21	9.8	83
	ケイ酸カリウム	0W	40	4.6	2.8	90	54	20	9.4	81
	ケイ酸カリウム	1W	40	4.8	2.6	100	55	21	10.0	83
	熔成燐肥	0W	20	4.7	2.7	92	53	19	10.0	84
	熔成燐肥	1W	20	4.7	2.5	103	55	22	9.6	88
	熔成燐肥	0W	40	4.7	2.9	91	57	20	10.9	93
	熔成燐肥	1W	40	5.0	2.7	108	59	22	10.0	88
	液体ケイ酸	0W	10	5.0	2.6	100	53	21	10.0	87
	液体ケイ酸	1W	10	4.7	2.6	107	61	23	9.2	86
	液体ケイ酸	0W	20	4.7	2.8	104	61	22	10.5	88
	液体ケイ酸	1W	20	4.6	2.6	102	58	22	9.5	87
	ケイ酸カルシウム	基肥	150	5.9	3.7	101	63	17	11.1	92
	ケイ酸カリウム	基肥	150	5.2	3.1	97	58	19	10.1	84
	熔成燐肥	基肥	150	4.8	3.1	93	59	20	9.4	88

施用時期は、0W：幼穂形成期、1W：幼穂形成期後7日目

表43. ケイ酸質肥料の施用が不稔歩合および収量・品質に及ぼす影響

試験年次	ケイ酸質肥料	施用時期	施用量 g m <sup>2</sup>	地上部 総重 g m <sup>2</sup>	精玄米 収量 g m <sup>2</sup>	窒素玄米 生産効率 kg Nkg <sup>-1</sup>	不稔 歩合 %	タンパク質 含有量 g kg <sup>-1</sup>	良質粒 歩合 %	千粒重 g
1996	無施用	—	—	1315	519	46.1	22.4	58	84.4	—
	ケイ酸カリウム	1W	50	1451	567	50.4	16.8	53	86.3	—
	熔成燐肥	1W	50	1434	555	46.7	15.8	55	86.0	—
1997	無施用	—	—	1668	665	49.3	17.5	65	77.0	20.6
	ケイ酸カルシウム	1W	40	1654	643	53.4	15.6	58	77.3	20.4
	ケイ酸カリウム	0W	40	1733	660	49.6	17.7	63	72.9	20.5
	ケイ酸カリウム	1W	40	1645	645	52.5	12.1	59	75.9	20.6
	熔成燐肥	0W	40	1663	681	62.4	13.2	62	77.4	20.4
	溶成燐肥	1W	40	1747	680	50.2	14.0	63	76.3	20.5
	液体ケイ酸	0W	20	1772	695	52.7	16.8	66	73.4	20.4
	液体ケイ酸	1W	20	1668	651	53.2	15.6	59	76.1	20.3
1998	無施用	—	—	1424	583	52.6	21.4	65	88.1	21.4
	ケイ酸カルシウム	0W	20	1451	586	61.7	17.0	57	93.9	21.5
	ケイ酸カルシウム	1W	20	1487	629	69.2	14.7	56	94.7	21.5
	ケイ酸カルシウム	0W	40	1515	619	64.6	14.2	56	92.7	21.6
	ケイ酸カルシウム	1W	40	1549	642	64.5	16.0	55	93.6	21.3
	ケイ酸カリウム	0W	20	1504	605	61.5	16.6	57	93.8	21.6
	ケイ酸カリウム	1W	20	1557	631	64.9	14.4	55	93.7	21.7
	ケイ酸カリウム	0W	40	1485	639	68.3	17.3	54	93.1	21.6
	ケイ酸カリウム	1W	40	1537	629	64.7	13.7	55	94.4	21.4
	熔成燐肥	0W	20	1535	653	65.4	20.6	57	92.4	21.7
	熔成燐肥	1W	20	1557	620	64.6	15.0	54	92.5	21.5
	熔成燐肥	0W	40	1565	617	56.4	19.3	57	93.1	21.6
	熔成燐肥	1W	40	1429	579	59.5	16.0	55	92.8	21.6
	液体ケイ酸	0W	10	1562	666	66.7	12.7	55	92.7	21.7
	液体ケイ酸	1W	10	1487	592	64.7	18.8	54	94.6	21.4
	液体ケイ酸	0W	20	1554	578	54.8	20.7	55	92.8	21.5
	液体ケイ酸	1W	20	1510	608	64.2	13.2	55	93.3	21.6
	ケイ酸カルシウム	基肥	150	1607	635	57.2	19.3	59	88.4	21.6
	ケイ酸カリウム	基肥	150	1635	627	62.2	15.9	61	92.0	21.2
	熔成燐肥	基肥	150	1518	634	67.7	23.5	61	93.4	21.7

施用時期は、0W：幼穂形成期，1W：幼穂形成期後7日目  
 精玄米収量には、篩目1.90mmを使用した。良質粒歩合と千粒重の測定には精玄米を用いた。

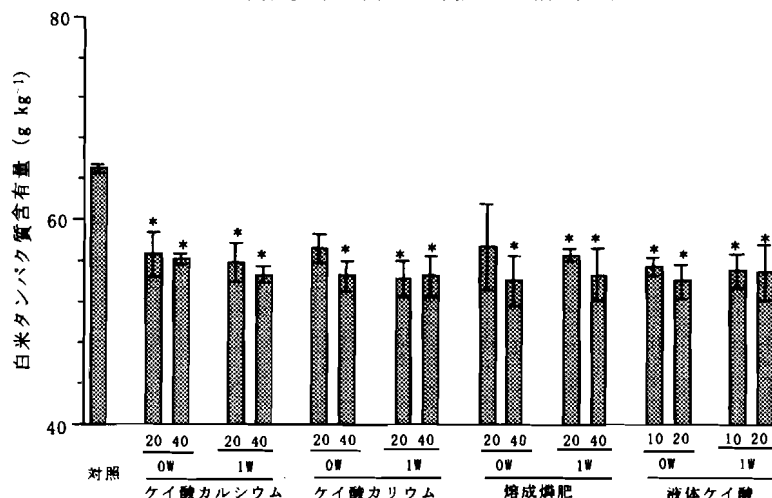


図48. ケイ酸質肥料の追肥が白米タンパク質含有量に及ぼす影響 (1998年)

施用時期は、0W：幼穂形成期，1W：幼穂形成期後7日目 図中の垂線は標準誤差を示す  
 \*) Dunnettの検定により、対照区に対して5%水準の有意差が認められた処理

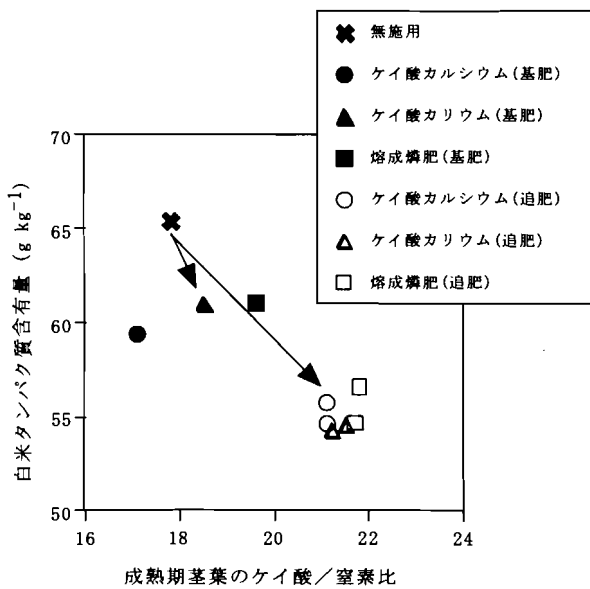


図49. ケイ酸質肥料の施肥法が成熟期の茎葉ケイ酸/窒素比と白米中のタンパク質含有量に及ぼす影響 (1998年)

施肥量は、基肥で150g m<sup>-2</sup>、追肥(幼穂形成期後7日目)で20および40g m<sup>-2</sup>

幼穂形成期後7日目追肥で幼穂形成期追肥より、不稔歩合の低い事例が多かった。地上部総重および精玄米収量、窒素玄米生産効率は追肥により増加したが、肥料の種類および追肥時期、追肥量の影響は判然としなかった。白米タンパク質含有量は、追肥により低下する傾向にあり、追肥時期で比較すると幼穂形成期追肥 $\geq$ 幼穂形成期後7日目追肥であった(図48)。成熟期茎葉のケイ酸/窒素比と白米タンパク質含有量の関係について、基肥と追肥処理を比較したところ、肥料の種類に関わらず、幼穂形成期後7日目の追肥が基肥施用と比較してケイ酸/窒素比が高まり、それに伴い白米タンパク質含有率が低下した(図49)。良質粒歩合に及ぼす影響は1997年で判然としなかったが、1998年は追肥によって増加した。千粒重に関しては一定の傾向が認められなかった(表43)。

### 5-3 論議

本試験では、穂ばらみ期の指標として止葉期を扱い、その窒素・ケイ酸栄養条件、特にケイ酸施用が不稔発生に及ぼす影響について検討した。水稻のケイ酸栄養改善は葉面積の拡大とそれに伴う光合成量の増加、受光態勢の改善、根活性の向上や枯れ上がり抑制に効果があるとされ、これらの複合的な効果として多くの知見がある<sup>24,25)</sup>。また、ケイ酸カルシウムを施用した場合に、花粉のタペート肥大の発生低下<sup>157)</sup>や不稔歩合の低下<sup>149,150)</sup>も報告されている。これに対し、本試

験でも、ケイ酸施用(基肥および追肥)による不稔発生軽減効果が認められた(表36, 表38)。また、止葉期の茎葉の窒素とケイ酸含有量を分析した結果、ケイ酸施用がケイ酸含有量を高めるとともに、特にケイ酸追肥区で窒素含有量を低下させる傾向が得られた(表36)。葉身窒素濃度の増加が不稔発生を助長することは良く知られており<sup>139,144)</sup>、ケイ酸施用はケイ酸含有量を高めることによる生育向上と光合成の促進による炭水化物量の増大が図られ、相対的に窒素含有量を低減することで稲体の耐冷性を強化した可能性がある。

さらに本試験では、「窒素-ケイ酸栄養」と「不稔発生」のメカニズムを解析するため、出穂始めの葯長を調査した。葯長1.8mm以下では葯長の短縮に伴い不稔歩合は増加するという過去の報告<sup>147)</sup>と同様に、人工気象室内で不稔歩合を高めた試験2では、出穂始めの葯長が1.7mm以下と短かった(表38)。ただし、冷害年であった平成5年の平均気温が平年値-2~-3℃程度であった<sup>143)</sup>ことと比較すると、試験2で行った人工気象室内における温度処理(日中22℃-夜間18℃, 平均20℃)は平年値-1.5℃程度であり、必ずしも著しい低温処理ではない。品種により影響が異なるが、遮光が低温障害を助長するとの報告<sup>144)</sup>もあり、葯長の短縮に対しては低温の影響に加えて、人工気象室による日射量の減少なども影響していたと推察される。また、試験1の葯長については、1.8mm以下のものがあり、葯長と不稔歩合の間には試験1、試験2ともに負の高い相関関係が認められた(図42)。

葯長は内部の充実花粉数と関連していることが知られており<sup>145,146)</sup>、充実した花粉の蓄積には十分な炭水化物の生成・転流が必要と考える。そこで、本試験では止葉期の茎部の炭水化物含有量に着目して分析を行った。その結果、窒素施用量に関わらずケイ酸を施用した区、特にケイ酸追肥区で止葉期の茎部炭水化物含有量が高まり、同様に葯長も増加していた(図38, 図41)。また、葯の伸長には止葉期の炭水化物含有量と高い相関関係が認められた(図40)。これは花粉の成熟に対して止葉期の炭水化物蓄積が重要であることを意味すると考え、この点については冷害時における優良事例でも指摘されている<sup>150)</sup>。この場合、炭水化物は解糖系によるエネルギー生成や生体膜合成の基質として寄与すると考えられる。ただし、不稔発生機構の研究から、低温障害により葯への炭水化物などの還元物質やデンプンの転流阻害はなく、タペート細胞から小孢子への物質転流が阻害されているとされる<sup>142)</sup>。また、

小孢子初期の冷温障害の原因として、4分子期まで小孢子を包んでいるカロース膜の溶解異常と葯腔液の酸性化時期のずれが挙げられている<sup>159)</sup>。したがって、低温生理においては生体膜の正常な形成が重要であり、稲体の炭水化物が生体膜合成プロセスに対して影響を及ぼす可能性がある。北海道における過去の報告<sup>158), 160)</sup>でも、穂ばらみ期における遮光により不稔歩合が増加した事例もあり、光合成量減少に伴う炭水化物の不足の影響が示唆される。

「不稔歩合-葯長-炭水化物含有量」の関係について、試験1と試験2の結果がほぼ同一曲線により説明されたことは、圃場と人工気象室内で栽培環境が異なっても、葯長および炭水化物含有量と稲体の耐冷性の間に強い連携があることを示していると考えられる(図40, 図42)。また、茎部の炭水化物含有量は、窒素含有量と負の相関関係にあり、ケイ酸含有量とは正の相関関係が認められた(図39)。したがって、ケイ酸施用では、ケイ酸含有量の増加・窒素含有量の低下、ケイ酸/窒素比の向上、単位面積当たりの光合成能向上などに伴う、炭水化物蓄積の改善効果を経由して水稻の冷害耐性強化に効果があったと推察する。

以上の結果をまとめると、筆者は「ケイ酸施用→ケイ酸吸収増加→単位面積当たりの光合成能向上→乾物生産増加→窒素含有量低下・ケイ酸/窒素比の向上→炭水化物含有量の増加→充実花粉の増加・葯長の増加→冷害耐性強化」という作用があったと考える。ただし、ケイ酸/窒素の影響を光合成能向上および炭水化物蓄積、それに続く生体膜機能向上のみですべてを説明することは早計であると考えられる。穂ばらみ期の耐冷性に関しては、植物ホルモンからのアプローチもあり、窒素吸収の多少や遮光が根由来のサイトカイニンや内生ジベレリンの生成に影響することが知られており<sup>161)~163)</sup>、これが地上部の各器官に反応する伝達経路のモデルも示されている<sup>164)</sup>。具体的に不稔発生との関係では、根量および生理活性の低下やサイトカイニンの増加が穂ばらみ期の耐冷性を低下させるとの報告もある<sup>165)~167)</sup>。これらを考慮すると、ケイ酸施用が根の生理活性を高め、水稻体内における相対的窒素濃度低下がサイトカイニンやジベレリン濃度を低下させるなどの機作を介して葯の生育を促進できた可能性もある。これに関しては、本試験だけでは十分に解析できず推測の域を出ないため、今後の課題と考える。止葉期の適当な窒素・ケイ酸栄養レベルについても、単年度の本試験結果から早計に判断するのは難しく、複数

年の気象条件における検討が必要と考える。

次に、不稔発生軽減に対して、ケイ酸の施用効果が基肥区より追肥区で高い結果となった要因については、ケイ酸の吸収時期との関連が挙げられる。一般に窒素の吸収は生育初期に多く、幼穂形成期以前の吸収量が総窒素吸収量の半量以上を占めているのに対して、ケイ酸の吸収量は分けつ期以降に増加する<sup>59)</sup>。これは、水稻側の要因と土壌側の要因と2つの要因があると考えられるが、水稻にとってケイ酸は積極吸収される養分であるため、生育初期には根群が作土層に十分に伸長していないことと、水稻のケイ酸に対する要求度が地上部の乾物生産が大きくなる幼穂形成期以降に高まるためと考えられる。土壌側の要因としては、土壌還元発達の伴い溶出が促進されることから、生育後半のケイ酸供給能が高まるものと考えられている。本試験の場合は、止葉期までのケイ酸吸収量はケイ酸基肥区で、止葉期~成熟期のケイ酸吸収はケイ酸追肥区で高い傾向にあった(表37)。基肥で与えられたケイ酸は生育初期から吸収・利用されるが、土壌吸着やアンモニウムイオンとの共存による吸収抑制<sup>68)</sup>などの影響も考えられ、またケイ酸石灰の基肥は生育初期から中期に効果があり、出穂以降の肥効は少ないとも報告されている<sup>64)</sup>。したがって、ケイ酸基肥区では、初期生育促進による乾物生産増加とケイ酸吸収量増加があったと考えられる。ケイ酸追肥は基肥と比較して、水稻のケイ酸要求の高い幼穂形成期以降、特に穂ばらみ期の指標である止葉期前後およびそれ以降の水稻において効率的に吸収・利用されたと考えられる。

窒素含有量の観点から見ると、止葉期の窒素含有量はケイ酸基肥区でケイ酸追肥区より高く(表36)、窒素吸収量もケイ酸基肥区で最も多い傾向にあった(表37)。成熟期の総窒素吸収量もケイ酸基肥区で多く、止葉期~成熟期の窒素吸収はケイ酸追肥区で多い傾向にあった(表37)。さらに、収量調査ではケイ酸追肥区で1穂粒数と総粒数が基肥区に勝る傾向にあり、ケイ酸基肥区で穂数と総粒数が勝る傾向であった(表39)。

これらのことは、ケイ酸の基肥施用が生育初期からの分けつ促進効果があり、茎葉も含めた総生育量が大きくなったのに対して、ケイ酸追肥の場合は主に顕花発育および退化時の稲体栄養条件を向上し、1穂粒数の増加に反映したと推察する。つまり、ケイ酸基肥区は初期から生育全体を促進し、ケイ酸栄養の向上に伴う乾物生産向上と同時に窒素吸収も高められ、その結果ケイ酸含有量およびケイ酸/窒素比が高まったのに

対して窒素含有量の抑制効果は低くなったと考えられる。ケイ酸追肥区は窒素吸収を高める効果は小さく、むしろ止葉期では窒素含有量・窒素吸収量とも統計的有意でないもののケイ酸無施用区より低い傾向にあった。ゆえに、光合成向上に伴う乾物生産増加による窒素希釈効果と追肥直後のアンモニア吸収の抑制が複合して発現した可能性がある。このような作用から、不稔軽減に対しては冷害危険期の窒素含有量抑制と炭水化物含有量増加により、ケイ酸追肥区がケイ酸基肥区より効果的であったと判断する。ただし、アンモニウムイオン増加がケイ酸吸収を抑制するのに対して、ケイ酸施用によるアンモニウムイオンの吸収抑制はないとの水耕試験における報告<sup>169)</sup>や、圃場試験のケイ酸基肥施用における窒素吸収量は無施用区と同程度であったとの報告<sup>165)</sup>もある。本試験における追肥処理（幼穂形成期）～止葉期の窒素吸収抑制については、その機作も含めて検討が不十分であり、さらに検証が必要と考える。

収量や産米品質については、不稔歩合の低下が精玄米収量を高め、各米粒に配分される粒当たり窒素を減少することにより、白米タンパク質含有量を低下させる結果を得た（表39）。一般に、ケイ酸含有量の高い稲の方が単位面積当たりの葉身光合成能が高まるとされており、これは登熟期間における葉身からの過剰な蒸散を抑えることで、葉の枯れ上がりが減少したためと考えられる。さらにケイ酸施用により稲の生育を促進することが認められ、このことから光の受け皿である葉の面積が拡大される。（単位面積当たりの光合成能の向上）×（葉面積の増加）＝（稲個体としての光合成量の増加）と考えられる。光合成能が高まることは、通常ならば屑米や青未熟米となって捨てられていた粒も充実した良質粒となることで、収量の増加・品質の向上をもたらすものと推察される。また、玄米白度は良質粒歩合と正の相関関係が認められる。これは、玄米白度が玄米の熟色により影響を受けることから、青未熟粒が減少し良質粒が増えることで、玄米白度が高くなることによる。したがって、ケイ酸施用によって玄米生産効率が高まることは、玄米白度の向上にも効果的であることが判った。また、近年の米流通においては低タンパク質米であることが重視されており、この観点からもケイ酸栄養改善が重要であると考えられる。

次に、培養実験におけるケイ酸溶出試験の結果を見ると、添加したケイ酸質肥料からの溶出は施用直後に

多く、その後次第に減少する傾向を示した（図45）。また、表面施用と土壌混合では差が判然としなかった（図46）。このことから、ケイ酸質肥料を土壌表面に追肥することで、生育ステージに対応して比較的速やかに地表水中のケイ酸濃度を高められる可能性がある。ただし、ケイ酸質肥料の特性としてはpH上昇に伴い、土壌からの窒素放出を若干促進する可能性があり、本実験の結果もそれを示唆した。先にも述べたように、水稻生育と産米品質については、ケイ酸栄養と窒素栄養の両面から検討する必要がある。以下では、ケイ酸質肥料の追肥が幼穂形成期以降の水稻生育と産米品質に及ぼす影響について考える。

ケイ酸質肥料の追肥はシリカゲルによる試験と同様に稲体栄養条件の改善をもたらし、不稔発生の低減と乾物生産の向上を示した（表43）。また、窒素玄米生産効率も高まることが明らかとなった。先に述べたように、玄米生産効率が高まった場合、稲の収量が増加するのに反比例し、吸収されていた窒素は薄められ、増収した分だけ白米中のタンパク含有量が低下することになる。基肥処理（150g m<sup>-2</sup>）と追肥（20, 40g m<sup>-2</sup>）の比較では、成熟期のケイ酸吸収量は基肥と追肥処理間で大差ないが、茎葉のケイ酸/窒素比は追肥処理の方で高まる傾向にあった（表42）。また、窒素玄米生産効率ではケイ酸カルシウムおよびケイ酸カリウムの追肥処理で基肥処理よりも高まり、白米中のタンパク含有率に関しては全ての資材で追肥処理の方が低下する傾向にあった（図48）。ただし、ケイ酸質肥料の追肥の条件については、肥料の種類および追肥時期で異なる。これまでの結果を総合的に考察すると、追肥時期は幼穂形成期と幼穂形成期後7日目の追肥に有意な差を認められないが、止葉期の基部炭水化物含有量や成熟期茎葉のケイ酸/窒素比の向上、白米タンパク含有率の低下などについて幼穂形成期後7日目の追肥が幼穂形成期追肥の効果を上回る事例が多かった（図47, 図48）。また、ケイ酸質肥料の特性としては土壌からの窒素放出を促進し、ケイ酸追肥による葉身窒素含有量の低下に反する効果をもたらす可能性もあることから、幼穂形成期後7日目の追肥が望ましいと判断した。また、施用量については、追肥の労力を考慮すると20~40g m<sup>-2</sup>程度で一定の効果が期待されると判断するが、窒素施肥量や土壌条件も含めて検討すべき事項と考えられる。

このように、ケイ酸質肥料の追肥は、水稻の不稔発

量の低下、良質粒歩合および玄米白度の向上) に有効であったが、初期生育の促進や総粒数の増加についてはケイ酸質肥料を基肥で施用した方が優る。また病害虫に対する抵抗力のためにも、土壌のケイ酸肥沃度を高めることが必要である。水稻はケイ酸を $100\text{g m}^{-2}$ 近く吸収することから、 $20\sim 40\text{g m}^{-2}$ 程度のケイ酸質肥料(ケイ酸成分 $20\sim 30\%$ )の追肥だけでケイ酸吸収量を十分に満たすことはできない。

したがって、筆者はケイ酸質肥料を基肥で与えた上で、さらに安定・高品質な米づくりのためにケイ酸質肥料の追肥を行うべきと考えている。しかし、追肥の労力など課題もあるため、今後は簡便なケイ酸質肥料の追肥法、安価でかつ溶出性の高いケイ酸質肥料の開発、基肥施用との有効な組み合わせ条件、ケイ酸追肥の要否判定法などの検討すべき課題が残されている。



## 第6章 総合考察

北海道は、日本列島の最北端に位置し、亜寒帯気候の特徴を有し、水稻の生育に重要な夏期には冷涼なオホーツク高気圧の影響を強く受ける<sup>170)</sup>。このため、北海道の稲作は明治17年以降29回、戦後についても15回の冷害に遭遇しており<sup>140)</sup>、非常な困難を乗り越えて発展してきたと言える。北限に位置する北海道稲作が冷害を克服し、ここまでの安定・多収<sup>1)</sup>を得られたのは、不断の品種育成と栽培技術の進展<sup>1,13)</sup>によるところが大きい。しかし、戦後は増産を求められたことから、不利な気象環境の中で安定・多収を目指した結果、食味・品質の低下を招き、北海道産米は低い評価を受けた。

このようなことから、北海道では昭和46年(1971)から行われた米の生産調整において、高い生産調整比率が割り当てられた。このため、水稻の作付け面積は年々減少し、平成15年(2003)以降は12万haを下回る作付けとなっている。米価の低迷も加わり、北海道稲作は存亡に関わると言っても良いほどの事態に至っている。品種改良は「きらら397」「ほしのゆめ」「ななつぼし」などの良食味品種が育成されているが、その品質は未だ本州産米の特A米レベルに達していない。

食味関連成分であるアミロース含有率は品種による変動が大きく、タンパク質含有率は産地や栽培技術による影響が大きいことが知られている<sup>9)</sup>。したがって、北海道米は品種開発によるアミロース含有率のさらなる低下とともに、低タンパク質な米生産を目指した栽培技術の開発が望まれる。

本研究の目的は、低タンパク質米の生産を目指した肥培管理技術を確立することにある。そのため、生産基盤である水田土壌の化学性の実態と課題を明らかにし、加えて北海道における水田土壌の化学性と圃場有機物(稲わら残渣)分解に伴う初期生育の阻害要因の関連について解析するとともに、窒素とケイ酸施肥による生育の改善と食味に与える影響を解明し、もって北海道における低タンパク質米の生産に必要な肥培管理技術を確立した。本章では、主要項目の問題点の整理と若干の考察および論議を加える。

### 6-1 北海道における水田土壌の化学性の現状と問題点

米粒中のタンパク質含有率は、これまでの研究から

稲が吸収した窒素の玄米生産効率(精玄米重/総窒素吸収量)と負の相関関係を示すことが知られている。玄米生産効率の高い稲を目指すには、上記の式の分子である精玄米重の収量構成要素(穂数、一穂粒数)を十分に確保する必要がある。これは生育初期から健全かつ適正な生育を確保できることが重要となる。このような健全な稲の生育には、水田土壌基盤の適正化が不可欠であり、北海道では従来から土壌理化学性の基準、土壌診断と土壌区分に基づく施肥対応などが作成され、普及指導が行われてきた<sup>38,40)</sup>。しかし、過去の土壌調査事業は水稻の健全な生育や玄米生産効率に大きな影響を持つとされる培養ケイ酸、遊離酸化鉄、易還元性マンガンなどに関して十分な調査・解析が見られない。

水田土壌の化学性を診断基準値と対比すると(表8)、pH(H<sub>2</sub>O)は診断基準に示された下限値以下の割合が49.7%と多く、酸性化が進んでいることから水稻根の伸長や養分吸収に対して悪影響が懸念される。この酸性化の程度は交換性塩基類の存在量に影響される。強酸性の要因は水田土壌の交換性塩基、特に交換性カルシウムの低いことが原因と考えられる。しかし、交換性マグネシウムは平均値で574mg kg<sup>-1</sup>あり、診断基準以下の割合は12.8%と少ない。水野<sup>42)</sup>は北海道の中心部を横断する蛇紋岩地帯の理化学性を解析し、蛇紋岩土壌はマグネシウム含有率が高くアルカリ性を示すが、マグネシウムが溶脱すると強酸性化することを究明している。また、その周辺に分布する土壌はマグネシウムが高いことを明らかにしている。したがって、道央部の水田地帯で交換性マグネシウムの高かったのは、蛇紋岩地帯がその中心を横切っていることから、母材の特性に由来したものと考えられる。

水田土壌の培養窒素は水稻の生産力に関係する重要な項目であるが<sup>43)</sup>、従来の基準は収量性を重視し、設定されている。一般に稲体の窒素は施肥から20~30%、残り70~80%が土壌由来の窒素で構成されている<sup>44)</sup>。したがって低タンパク質米の生産には生育後半に吸収される土壌窒素の制御が必要となり、培養窒素の評価を活用した適正化技術の確立が求められる。また、窒素過多が懸念されていた泥炭土の培養窒素量がグライ土より低いのは(表1)、これまで多量の客土が実施されたことによるものと考えられる。ただし、培養窒素

は土壌区分内の変動が非常に大きいため、灌水前に作付け圃場の窒素診断を行い、窒素過多を避ける施肥対応が必要である。

有効態リン酸は平均値で $500\text{mg kg}^{-1}$ であり、診断基準の下限值 $100\text{mg kg}^{-1}$ の5倍ときわめて高く、リン酸の蓄積傾向が認められた。北海道における1900年代の稲作研究では冷害を克服するための技術開発が主要であり、遅延型冷害に対するリン酸施肥の効果が高かった<sup>45)</sup>。このためリン酸は水稻の吸収量をはるかに上回る施肥が行われ、蓄積が進んだものと考えられる<sup>46)</sup>。有効態リン酸の蓄積に対しては減肥対応が指導され、 $300\text{mg kg}^{-1}$ 以上の場合のリン酸施肥は標準量の半量( $4\text{g m}^{-2}$ )とされている。しかし $500\text{mg kg}^{-1}$ 以上のような著しいリン酸過剰に対して、さらなるリン酸減肥が可能であるか判断する材料はない。北海道でのリン酸の肥効は移植期から幼穂形成期の地温の低い時期が重要であり、この時期は還元の発達が小さいため、土壌からの供給は少ない。したがって施肥リン酸の役割は大きく、リン酸肥沃度に関する基準と施肥対応の関係について、さらなる検討が必要と考えられる。

ケイ酸吸収は葉の水分状態を良好に保ち光合成の促進<sup>49)</sup>、いもち病<sup>50)</sup>、葉鞘褐変病の軽減<sup>51)</sup>、食味の向上<sup>27)</sup>など各種効果が明らかにされている。このためケイ酸質肥料は全国各地の水田で利用されており、その利用率は20~50%、平均30%と見積もられている<sup>52)</sup>。また吸収されたケイ酸は大部分が稲体中でプラントオパールとなるが、これは風化に対する抵抗性が強く<sup>53)</sup>、住田<sup>54)</sup>は稲わらや稲わら堆肥に含まれるケイ酸の利用効率をそれぞれ6%、3%であるとしている。北海道の水稲のケイ酸吸収量を仮に $100\text{g m}^{-2}$ (稲体乾物 $1000\text{g m}^{-2}$ 、ケイ酸含有率10%と仮定)とすると、稲わらや稲わら堆肥から $3\sim 6\text{g m}^{-2}$ が供給されるため、ケイ酸質肥料( $20\text{g m}^{-2}$ と仮定)から $4\sim 10\text{g m}^{-2}$ 供給されることになる。この条件では土壌や灌漑水から $84\sim 93\text{g m}^{-2}$ 相当量のケイ酸供給が必要とされる。また、ケイ酸含有量を高めることは、先述した窒素玄米生産効率の分子である精玄米重を千粒重や登熟粒数の改善により向上すると考えられる。過去の北海道における報告でも、ケイ酸肥沃度の向上は、低タンパク米生産に有効と判断され、その適正域を培養ケイ酸で $160\text{mg kg}^{-1}$ 以上、 $100\sim 160\text{mg kg}^{-1}$ をやや不足域、 $100\text{mg kg}^{-1}$ を不足域とした<sup>27)</sup>。これに対して本研究における培養ケイ酸は平均値で $103\text{mg kg}^{-1}$ ときわめて低く、51.0%の水田で診断基準の下限值である $100\text{mg kg}^{-1}$ を下回ってい

た(表8)。培養ケイ酸濃度を3次メッシュに展開した結果(図11)、特に培養ケイ酸濃度が水田面積の多い北海道中央部で低いのは大きな問題であり、ケイ酸供給力を勘案したケイ酸質肥料の施肥対応が求められる。また、 $80\text{mg kg}^{-1}$ 以下の著しい不足域の水田に対しては客土によるケイ酸供給技術の活用も必要である<sup>33)</sup>。本試験では、客土やケイ酸資材施用を検討し、客土やケイ酸資材の施用による土壌ケイ酸肥沃度の増進により、白米タンパク質含有量を低下でき得ることを明らかにした。また、これに加えて客土技術は、有機物含量の少ない客土材を選ぶことにより、可給態窒素の放出量を低下させることが可能である。

遊離酸化鉄の平均値は $18.6\text{g kg}^{-1}$ と診断基準の下限值( $15.0\text{g kg}^{-1}$ )を上回ったが、変動も大きく45.8%の水田でこれを下回り、 $10.0\text{g kg}^{-1}$ 以下も15.2%認められた。北海道の水田土壌は泥炭土など易分解性有機物の高い土壌型、灰色低地土・グライ土など排水不良な土壌型が多いことから<sup>17)</sup>、Eh(酸化還元電位)が低下し易いと考えられる。さらに遊離酸化鉄含有量が低い水田に対する稲わらなどの新鮮有機物の投入は、Ehの急速な低下をまねき、水稻の生育に悪影響を与えることが懸念される。また、過去には秋落水田における硫化水素の発生が土壌中の遊離酸化鉄濃度の低い土壌で多いこと<sup>56)</sup>、含鉄資材及び客土材の施用でその生成が抑制されること<sup>57)</sup>が報告されている。北海道でも水野<sup>30)</sup>は硫黄(S)1に対し遊離酸化鉄( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ )として5以下では水稻根の生育が顕著に抑制されることを明らかにした。さらに硫黄を多く含む十勝岳泥流地帯において、遊離酸化鉄を多く含むアルミニウム精錬鉍滓の施用により、水稻生育の改善が認められている<sup>32)</sup>。水田土壌の遊離酸化鉄は、稲わらなど易分解性有機物の分解が起こってもEhの低下による水稻根の障害が見られない程度、また土壌中の硫黄に対するバランスを維持できる程度に高めることが肝要と考えられる。特に土壌区分から見た火山性土系や地域性から見た中央部太平洋岸など、遊離酸化鉄濃度が低いと予想される場合は、遊離酸化鉄の適正な水準を目指した客土もしくは含鉄資材の施用による土壌改良が必要と考えられる。客土および含鉄資材施用は、土壌の遊離酸化鉄濃度を高め、根圏環境を改善して根活性を向上させた。水稻の生育は、幼穂形成期における茎数の増加が見られ、これが穂数の増加をもたらした。遊離酸化鉄濃度の適正值に関しては、全硫黄濃度 $0.8\text{g kg}^{-1}$ 以下の水田土壌における遊離酸化鉄の適正水準を $20\text{g kg}^{-1}$ (Fe/S

モル比10)とし、全硫黄濃度 $0.8\text{g kg}^{-1}$ 以上の水田土壌の場合には遊離酸化鉄濃度が $20\text{g kg}^{-1}$ 以上であっても、Fe/Sモル比10を目標に遊離酸化鉄濃度を高めるべきと判断し(図17, 図18), これを基準とした改善技術の実施を提案した。

以上のように、化学性の観点からみた北海道の水田土壌は、交換性塩類が少ない強酸性土壌が多く分布し、加えて可給態のケイ酸と遊離酸化鉄含有量の少ない、本州における老朽化水田に類似した土壌の多いことを明らかにした。したがって、これらを改善することにより、水稲初期生育の改善が図られ、収量構成要素の増加や登熟能力向上による低タンパク質米の生産が図られるものと判断される。

## 6-2 土壌有機物管理が高品質米生産に与える影響

先の土壌改良の試験を見ると、遊離酸化鉄濃度の増加は土壌還元を抑制する効果があり、水稲の初期生育、特に根の伸長を促進することが認められた。水田土壌の還元発達を大きく左右する要因としては、湛水条件下で嫌氣的分解される稲わらなどの多少が挙げられる。初期生育の抑制と養分の吸収阻害は、すき込まれた有機物の嫌氣的分解に伴う芳香族カルボン酸生成が大きな要因とされる<sup>65,66)</sup>。培養試験結果を見ると、稲わら無施用条件では芳香族カルボン酸(安息香酸, 2-フェニルプロピオン酸, 3-フェニルプロピオン酸)の発生量が非常に小さいのに対して、稲わら添加条件で著しく高まっていた(表12, 表13)。したがって、北海道の水田土壌においても稲わらすき込み条件による芳香族カルボン酸の蓄積が、水稲の初期生育に大きなダメージを与えている可能性があると考えられる。また、そのピークは $30^{\circ}\text{C}$ で10日後頃(積算温度 $300^{\circ}\text{C}$ )、 $20^{\circ}\text{C}$ で13日~20日後頃(積算気温 $260^{\circ}\text{C}$ ~ $400^{\circ}\text{C}$ )であった。本道水田の5・6月の水温・地温は $20^{\circ}\text{C}$ 以下であり、具体的に上川農試で調査したデータでは、6月の地温(深さ10cm)の平均が $15\sim 20^{\circ}\text{C}$ の範囲内に推移していた(図22)。したがって水田での芳香族カルボン酸のピークは、一般的に入水が行われる5月中旬から約1ヶ月後頃の6月上旬~中旬、すなわち活着から茎数増加にかけての重要な時期に当たる。

上川農試の稲わら連用(稲わら春混和)土壌では、有機物無施用土壌より各種芳香族カルボン酸濃度が低く推移した(図23)。これは、稲わら連用により、水田土壌中における分解菌の活性が高まり、有機物分解の中間生成物である芳香族カルボン酸の滞留時間を短

縮している可能性がある。ただし、寒冷地の稲わら分解に伴う生育阻害物質の蓄積と稲わら連用による土壌の有機物分解活性の向上の関係については、知見が少なく、今後さらに研究が必要と考える。また、芳香族カルボン酸の生成・蓄積には土壌間差異が認められ、易分解性有機物量や分解菌(嫌気性菌)の存在状態、さらに土壌の酸化容量(土壌中の酸素, 硝酸, 易還元性マンガン, 遊離酸化鉄を酸素に換算合計したもの)の大小が影響していると考えられる。遊離酸化鉄の補給(酸化容量の拡大)を行った区の芳香族カルボン酸のピークは、無施用に対して低く、かつ発生期間が短期間に抑えられていた(図24)。

このように、稲わら等未分解の有機物が湛水条件である水田作に持ち込まれることは、嫌氣的な分解生成物の発生から見て、望ましいことではないが、実際場面においてその搬出は容易でない。また、「有機農業」「クリーン農業」などに見られるように、地力の維持や肥沃度の向上からは、有機物(稲わらも含めて)を用いた水稲栽培が求められる。ゆえに、予想される有機物の分解や土壌還元、有害物質の蓄積などを最小限にとどめつつ、有機物資源の有効活用を図らなければならない。本試験では、湛水以前の稲わらの好氣的分解を促進し、湛水後の分解基質を減少する方法、湛水期間の土壌還元を抑制し、有害物質の排除方法について検討した。

水田への分解基質持ち込みを減少する手法としては、稲わらの圃場外への持ち出しや堆肥化による分解促進が有効である<sup>81,85)</sup>。しかし北海道では稲わらの約6割が圃場に放置され、その多くが春にロータリー混和される実態を勘案すると<sup>89)</sup>、圃場内における分解促進手法の確立が重要となる。過去にも分解促進のための資材について検討されているが、その効果は報告によって異なる<sup>87~89)</sup>。また、北海道における冬期間の水田地温は、本州以南と比較して低温に推移する<sup>90,91)</sup>。本試験を行った上川農試水田における調査では、非湛水期間で平均地温 $10^{\circ}\text{C}$ 以上を確保できるのは収穫時(9月)~10月下旬までと、4月下旬~5月上旬のわずかな期間に限られ、稲わらを酸化的に分解する微生物の活動は極めて低いことが推測される。

培養試験の結果から稲わらの分解は $5^{\circ}\text{C}$ のような低温条件でも緩慢に進行しており、さらに窒素肥料および分解促進資材の添加で促進効果が認められた(表16)。一方、 $20^{\circ}\text{C}$ 培養では、資材添加による分解促進効果が $5^{\circ}\text{C}$ ほど顕著ではなかった。これは温度条件が高いこ

とにより、土着の微生物が十分に活動できる環境にあったため、さらなる資材添加効果が低かったと考えられる。過去に行われた調査から北海道における冬期間の稲わら分解率（10月下旬～11月上旬に散布し、5月中旬～下旬に回収）は20～40%と報告<sup>92)</sup>されており、より実態に近いと考えられる5℃条件の試験結果から、窒素肥料および分解促進資材添加は稲わら分解促進に有効であると判断される。

稲わらをすき込みの実態は、水田作土が多湿な条件で実施されることも多く、土壌の繰り返しによる透排水の不良と有機物分解に対する悪影響が見られる。これに対して木村ら<sup>93)</sup>、松本ら<sup>94)</sup>は有機物を表層のみに浅く混和することで有機物分解に伴う還元の軽減技術を提案した。土壌の表層は比較的水分が少ないために混和作業が容易であることや、深さ12～15cm程度の慣行のすき込みと比較して稲わらが表層に存在するため分解に必要な温度や酸素を得られるなどの利点が推察される。本試験の結果を見ると、土壌表層における稲わら秋混和区の炭素の減少率は、稲わら春混和と比較して有意に高くなっており、秋の土壌混和が稲わら分解に有効であった（表18）。さらに秋混和と分解促進処理（肥料添加、分解資材添加）を組み合わせた場合は、一層分解が促進されていた。次年度の水稻収穫時までにおける炭素の累積減少率は60%程度であり、各処理区の差は小さく、湛水期間の分解量は春耕りまでの炭素減少率が低い場合に高まる傾向にあった（表20）。既往の報告<sup>95-97)</sup>から推察すると、水稻の作付け後までに稲わらの易分解性画分（全糖、デンプン、ヘミセルロースなど）が分解され、収穫時には難分解性画分（リグニンなど）が残存したものと考えられる。

酸化的な土壌環境形成を目指した有機物分解による還元の軽減対策を提案するために、水管理と圃場排水改良について検討した。水管理として良く知られている中干し処理は、十分な土壌乾燥を行うことで、処理後に酸化還元電位が急速に上昇し、その後も比較的高く推移することが知られている<sup>98,99)</sup>。これは中干し処理によって水田土壌中に多量の酸素が供給されることで、土壌の表層がより酸化的状態に移行していることを示すものである。しかし、長期の中干しは幼穂に対する低温障害の危険性もあることから、十分な土壌の乾燥を得るのは容易でない。本試験では、中干しと比較して落水期間が短いため土壌乾燥は劣るが、一定の土壌酸化効果が期待される間断灌漑について検討した。

幼穂形成期前（6月下旬～7月初旬）における強程

度（pF1.8～2.0）の間断灌漑は、ほぼ中干しに準じる効果があった（図25）。しかし、pF1.5以下の弱程度の間断灌漑ではその効果が低かった。pF1.5以下の場合には、土壌中の粗大孔隙のみが排水され、そこに大気への侵入が行われた状態であり、土壌と酸素の接触面積が比較的少ないため酸化の程度も弱く、その効果も粗孔隙部に局在している。これに対してpF1.8以上になると土壌中の細孔隙の毛管水の一部とも大気との交換が進むため<sup>100)</sup>、土壌酸化される表面積が拡大するとともに、土層全体へ及んだためと推察される。これにより土層の広い範囲で土壌の還元発達を抑制し、有機物の分解生成物による生育の抑制をある程度軽減できるとともに、排水による有害成分の流去も期待される。

圃場の排水改良に関しては、暗渠排水に対する新たな補助工法である砂充填細溝心土破碎（砂心破）を開発し、細かい排水溝を圃場全体に密に形成することを試みた。強粘質な土壌に対する通常の無材心破は、水稻作付けにより溝の再連結が起り、その排水機能の持続性について問題となるが、砂心破の充填溝は、疎水材充填により施工3～4作後でも十分な排水機能を維持していた（表24、図28）。その結果、砂心破処理区は、湛水期間の縦浸透量および暗渠排水量が増加し、落水後の作土水分低下が認められた。浸透水による酸素供給は、湛水期間の土壌還元進行の緩和に有効であり、根圏環境の改善に効果を示した（図30）。水稻初期生育は、無施工区と比較して砂心破施工区で優る傾向にあり、根重の増加にも効果が認められた（表26）。成熟期茎葉のケイ酸含有率やケイ酸/窒素比も砂心破施工区で増加しており、土壌環境改善による根活力向上が生育後半まで、生育に対して良好な影響を与えたものと考えられる（表27、表28）。このような速やかな地表水排除と乾燥は、湛水期間の土壌還元を緩和すると同時に、秋収穫後の稲わらすき込みなど有機物管理についても作業を容易にすることから、実用場面のニーズに合致するものであると考える。

以上のように、有機物（特に稲わら残渣）施用が水稻の生育に及ぼす影響は古くから重要な課題となっている。現在指導されている稲わら搬出、堆肥化後の圃場散布は必ずしも容易でないことから、稲わらの春すき込みが多く見られ、稲わら残渣が湛水後に嫌氣的分解され、芳香族カルボン酸の生成などにより、初期生育を抑制している可能性が示唆された。これに対処するためには、収穫後速やかに作土表層に浅耕混和することが有効であり、その際には適当な窒素肥料および

微生物資材の併用が望ましい。幼穂形成期前の間断灌漑や新たな圃場排水技術として砂充填細溝心土破砕（砂心破）が還元の発達を抑制することや生育阻害物質の排除に有効であった。これらの技術は、初期生育の促進が図られ、収量構成要素（穂数、一穂粒数）の確保につながることから、低タンパク質米の生産技術として期待される。

### 6-3 高品質米生産を目指した窒素およびケイ酸の合理的施肥法

玄米生産効率の高い稲を目指すには、前述のように移植後の初期生育（根伸長、分けつ、穎花形成）の旺盛なことが望ましく、その対策の幾つかを示した。次に、生育中期以降は、形成された分けつや穎花のロスを少なくすること、特に不稔発生の抑制が重要である。出穂期以降は、葉身の光合成能を高く維持することにより、形成された各粒に十分な炭水化物（主にデンプン）を配分することが不可欠となる。ただし、生育量の増加が窒素吸収量の増加に連動した場合、玄米生産効率は高まらない。むしろ、窒素過多による過繁茂は葉身間の光競合による登熟不良や、倒伏などによる登熟停止などをもたらす可能性もある。また、低タンパク質米の生産には総窒素吸収量以外にも、窒素の吸収時期も関係すること、つまり生育後期に吸収される窒素が米粒中のタンパク質含有率を高めることが指摘されている<sup>15, 108, 110</sup>。したがって、低タンパク質米生産を目指すには、適切な窒素の吸収パターンとなる技術を確立するとともに、窒素当たりの乾物生産効率を高める観点からの水稻生育促進が望ましい。本試験では、これらのことを目指した合理的な窒素施肥方法およびケイ酸施肥方法の確立とその効果を解析した。

具体的には、重窒素標識硫酸を用いた施肥窒素量および表層施肥、側条施肥に関する試験を水田圃場で実施し、窒素の利用率とこれの分配、白米タンパク質含有量、さらにその経年的消長に関する影響を解析した。また、活着期から登熟期まで水稻の各生育ステージにわたって窒素の追肥試験を実施し、窒素の追肥時期と利用率、稲体内における分配、特に白米タンパク質含有量に及ぼす影響について検討した。

北海道の水田における施肥法は全層施肥が基本となっている。本試験における全量全層施肥した窒素の利用率は、ほぼ30～40%の範囲にあり、施肥窒素量の増加に伴って多くなる傾向にあった（表29）。成熟期の窒素吸収量に占める施肥由来窒素の比率も直線的に高まっ

た。これは、全量全層区（4, 8, 12, 16g m<sup>2</sup>区）の土壌由来窒素の吸収量が全量全層区で8.68～9.84g m<sup>2</sup>と若干増加しているのに対し、施肥窒素の吸収量（表29, A-B）は施肥量によって1.30～6.58g m<sup>2</sup>と顕著に増加するためである。

稲体に吸収された施肥窒素は水稻の各器官に分配・転流された後、その多くが米粒中に移行する<sup>125, 129</sup>。移行後の稲体における分配を見ると、吸収された窒素の穂部への分配率は全量全層4g m<sup>2</sup>区で65.8%、8g m<sup>2</sup>区で63.5%、12g m<sup>2</sup>区で61.9%、16g m<sup>2</sup>区で51.3%であり、反対に葉鞘および稈への分配率は施肥窒素量の増加に伴って増加する傾向にあった（図31）。その理由として、施肥窒素量の増加に伴って茎葉が繁茂するものの、不稔歩合の増加や登熟歩合の低下をもたらすことが挙げられる（表30）。吸収された窒素の穂部への分配率の低下は、一見して白米タンパク質含有量の低下につながるようにも考えられるものの、施肥窒素量に伴う施肥窒素吸収量の増加（8g m<sup>2</sup>区：2.84g m<sup>2</sup>→16g m<sup>2</sup>区：6.58g m<sup>2</sup>）が大きいことにより、分配率を乗じた白米への分配施肥窒素量（8g m<sup>2</sup>区：1.29g m<sup>2</sup>→16g m<sup>2</sup>区：2.60g m<sup>2</sup>）が増加した。8g m<sup>2</sup>区に対して16g m<sup>2</sup>区の白米へ分配された施肥窒素量が約2倍になっているのに対して、総粒数の増加は1.23倍にすぎなく、不稔歩合も2倍以上になっていたため、稈実粒数は1.03倍であった（表30）。このため、白米当たりに分配された施肥窒素量（1000粒当たりの窒素mg）は8g m<sup>2</sup>区で51.5mg、16g m<sup>2</sup>区で100.8mgと明らかに高まることから、結果的に白米中のタンパク質含有量（8g m<sup>2</sup>区：73.8g kg<sup>-1</sup>→16g m<sup>2</sup>区：84.9g kg<sup>-1</sup>）が高められたと考えられる。

次に、表層施肥と側条施肥はともに苗移植時の根近傍に窒素を施肥することにより、初期生育の促進を目的としている。これらの窒素施肥法は下位分けつの促進を通じて早期に茎数を確保でき、寒冷な北海道でも安定・多収が得られるとされる。したがって、これらの窒素施肥法では生育初期の茎葉の形成に対する関与が大きく、穂への窒素の転流は少ないことが予想された。表層施肥の利用率は全層施肥より低く、側条施肥に比較するとさらに低かった（表29）。また、側条施肥は全層施肥に比較して、穂部および白米への窒素の移行が少ない特徴があった（図31）。茎葉に関して詳細を見ると、側条施肥で葉身と葉鞘、特に葉鞘への分配が高まっていた。葉鞘への分配が大きいことは、水稻初期の窒素吸収が高まったことで分けつが促進され、

分けつした茎の形成に必要な窒素が葉鞘に移行したためと考えられる。出穂後には茎葉から穂へ窒素の転流が起こるものの、個体を維持していくために窒素を葉鞘および稈に保持する必要がある、茎葉に分配された窒素が高く維持されたものと推察される。

全層施肥由来の窒素は止葉期以降においても吸収されているが、表層および側条施肥に由来する窒素のほとんどが止葉期以前に吸収されていた(図32)。このことは、施肥位置によって窒素の利用率が異なるだけでなく、吸収時期や稲体各器官への分配が相異したことを示すものである。ゆえに、全層+表層区では、窒素の利用率が全層施肥に比べて低く、施肥窒素の吸収が生育の前期に集中するため穂部へ分配される窒素量が少なくなることから、白米タンパク質含有量が低くなると考えられる。全層+側条区では、施肥窒素の利用率が高いものの、全層+表層区と同様に窒素吸収が生育の前期に行われること、及び茎葉部への分配と比較して穂部への分配が小さくなることにより、白米タンパク質含有量が低下すると考えられる。また、不稔歩合は総施肥窒素量が同等の全量全層 $8\text{g m}^{-2}$ 区と比較して全層+側条区では少ない傾向にある。全層+側条区は止葉期以前の窒素吸収量(施肥由来と施肥由来以外の加算)が多いことから、初期生育が盛んになり、有効茎を早期に確保できたことが不稔の発生を少なくしたと推察される。これに対して、全量全層施肥では止葉期以降の窒素吸収も多く、遅発分けつから出穂した初が総粒数に含まれたため、結果的に不稔歩合が高まった可能性がある。この結果、白米当たり分配された吸収施肥窒素量(1000粒当たりの窒素 $\text{mg}$ )は全量全層 $4\text{g m}^{-2}$ 区の $28.4\text{mg}$ と比較して、全層+側条区の側条分 $4\text{g m}^{-2}$ で $21.9\text{mg}$ と少ない(表30)。

さらに、施肥された基肥窒素の残留と次年度以降への影響に関して検討した結果、施肥窒素は初年目にほとんどが利用され、2年目は初年目の1/10程度、3年目は初年目の1/20程度であった(表35)。ゆえに、基肥窒素の次年度以降の水稻への影響は小さいと考える。

これまで基肥窒素に関して述べたが、北海道において幼穂形成期後7日目の追肥と止葉期の追肥技術も普及していることから、追肥時期に関する試験を実施した。追肥窒素の利用率は、止葉期~出穂期後10日目追肥をピークにする傾向を示した(図33)。出穂期以降の利用率は概ね生育の進行に伴って減少する傾向にあった。これは出穂期頃までは水稻根の発達に伴い、追肥窒素を効率的に吸収できるようになったことを意味す

るが、出穂期以降は一般に新根の伸長はほとんど停止し<sup>131)</sup>、反対に老化が進むことにより吸収能が低下したことによるものと考えられる。追肥窒素の利用率に対する基肥窒素量の影響を見ると、幼穂形成期から出穂期の追肥窒素の利用率は、基肥窒素量の増加に伴って上昇する傾向を示した(図33)。これは、基肥窒素量が少ない条件では追肥前の茎葉および根の生長量が少なく、追肥窒素を吸収する能力が劣ったためと推察する。出穂期以降については、全体的には急速に低下していくものの、むしろ基肥窒素量の少ない基肥窒素 $6\text{g m}^{-2}$ 区で利用率の低下が緩慢であった。このことについて十分な解析は難しいが、穂部への蓄積が影響していると考えられる。窒素化合物および光合成同化産物に対する栄養生長期のシンクは新葉および根であり<sup>132)</sup>、根の生長に必要な窒素の多くが地上部から供給されている<sup>133)</sup>。これに対し、生殖生長期は穂部が強いシンクとなり、根への分配が減少する。また、シンクである穂を切除することにより、同化葉以外の葉および稈への光合成産物の蓄積が進む<sup>134)</sup>。すなわち、総粒数が少ない基肥窒素 $6\text{g m}^{-2}$ 区では出穂以降のシンク能が小さいため、光合成同化産物の穂部への分配が少なく、根部への分配が維持されることで旧根の活性を維持し、新根の伸長を促進したのではないかと推察する。また、稲の下位葉は根との関係が深く、下位葉から根に送り込まれた同化産物は根の呼吸に消費され、そのエネルギーによって養分が吸収される<sup>135)</sup>。したがって、多肥条件では過繁茂になり、下位葉への日射が不足することで根への同化産物の供給が不足したものと考えられる。

追肥窒素の分配率を生育ステージ別で見ると、出穂期までは生育の進行に伴って穂部への分配が高まる傾向を示した(表31)。特に幼穂形成期後7日目追肥と止葉期追肥を比較すると、止葉期は追肥窒素の利用率が高いことに加えて、同化部位である葉身への分配が低下するのに対して、貯蔵部位である穂の分配が高まっていた。これは、止葉期追肥の時期になると茎数や穂数がほぼ決定しているため、窒素の多くが形成過程にある穂部に蓄積したものと考えられる。

1994年と1995年の基肥窒素 $8\text{g m}^{-2}$ 区に追肥した結果を見ると、追肥窒素の白米利用率は出穂期後10日目 $\approx$ 出穂期 $\approx$ 止葉期 $>$ 幼穂形成期7日目 $>$ 幼穂形成期となった(図34)。これは、追肥窒素の利用率が止葉期~出穂期後10日目にピークとなったことや、稲体内における吸収窒素の各器官への分配先が生育の進行とともに

変化したことによるものと考えられる。白米に蓄積された窒素中の追肥由来窒素は、止葉期～出穂期後10日目の追肥時期で、白米中窒素の1割以上であった(表32)。また、止葉期～出穂期後10日目程度の追肥処理は、全層基肥窒素区(1995年無追肥)における白米タンパク質含有量(基肥窒素6g m<sup>2</sup>区が61g kg<sup>-1</sup>, 基肥窒素8g m<sup>2</sup>区が66g kg<sup>-1</sup>, 基肥窒素10g m<sup>2</sup>区が67g kg<sup>-1</sup>, 図表省略)と比較すると、白米タンパク質含有量で8~13g kg<sup>-1</sup>高まったことになる(表33)。これは、低タンパク質米を指向していく上で無視できるものではない<sup>(98)</sup>。これに対し、幼穂形成期～幼穂形成期後7日目の範囲では、白米タンパク質含有量の増加が0~6g kg<sup>-1</sup>程度であったことから、食味に及ぼす影響も比較的小さいと判断する。特に幼穂形成期後7日目追肥と止葉期追肥を比較すると、幼穂形成期後7日目追肥の場合、穂への分配率および白米への利用率が止葉期以降の追肥より低く、反対に総粒数を増加する働きの大きいことが認められる。このため、幼穂形成期後7日目追肥により吸収された窒素は個々の白米に転流する窒素が希釈され、白米当たりの分配追肥窒素量は高くないことから、産米の白米タンパク質含有量はあまり高まらない。止葉期追肥の場合、追肥窒素の利用率が幼穂形成期後7日目より高いとともに、総粒数を増加させる効果が小さいため、白米当たりの分配追肥窒素量は高く、産米の白米タンパク質含有量を高めたと考えられる。

以上の結果から、玄米収量と白米タンパク質含有量を勘案した場合、全層施肥と側条施肥の組み合わせが合理的であり、追肥に関しては止葉期以降の追肥は行わず、幼穂形成期後7日目に追肥を行うことが効果的と判断できる。

続いて生育中期以降の収量構成要素維持については、形成された分けつや穎花のロスを少なくする視点から、耐冷性を強化し、不稔発生の抑制を図る必要がある。耐冷性と葉身窒素濃度の関係は良く知られており、窒素濃度の増加が不稔発生を助長することから、その対策として過剰な窒素吸収の抑制が指導されてきた。しかし、耐冷性強化を目的とした大幅な窒素削減は収量確保の観点から困難であり、窒素施肥に依存しない冷害対策も必要である。過去のいくつかの報告から、ケイ酸含有量と窒素含有量は負の相関関係にあることが認められている<sup>(27, 148)</sup>。また、ケイ酸カルシウムを施用した場合に不稔歩合が低下した事例もある<sup>(149, 150)</sup>。したがって、本試験では、穂ばらみ期の指標として止葉

期を扱い、その窒素・ケイ酸栄養条件、特にケイ酸施用が不稔発生に及ぼす影響について検討した。ケイ酸にシリカゲルを用いた試験の結果、ケイ酸施用(基肥および追肥)による不稔の発生を軽減する効果が認められた(表36)。止葉期の茎葉の窒素とケイ酸含有量を分析した結果、ケイ酸施用がケイ酸含有量を高めるとともに、特にケイ酸追肥区で窒素含有量を低下させる傾向が得られた(表36)。ケイ酸施用はケイ酸含有量を高めることによる生育向上と光合成の促進による炭水化物量の増大が図られ、相対的に窒素含有量を低減することで稲体の耐冷性を強化した可能性がある。

出穂始めの葯長を調査した結果、葯長1.8mm以下では葯長の短縮に伴い不稔歩合は増加するという過去の報告<sup>(147)</sup>と同様に、葯長と不稔歩合の間にはともに負の高い相関関係が認められた(図42)。葯長は内部の充実花粉数と関連していることが知られており<sup>(145, 146)</sup>、充実した花粉の蓄積には十分な炭水化物の生成・転流が必要と考える。止葉期の茎部の炭水化物含有量を分析した結果、窒素施用量に関わらずケイ酸を施用した区、特にケイ酸追肥区で止葉期の茎部炭水化物含有量が高まり(図38)、同様に葯長も増加していた(図41)。また、葯の伸長には止葉期の炭水化物含有量と高い相関関係が認められた(図40)。これは花粉の成熟に対して止葉期の炭水化物の蓄積が重要であることを意味すると考えられ、この点については冷害時における優良事例でも指摘されている<sup>(150)</sup>。この場合、炭水化物は解糖系によるエネルギー生成や生体膜合成の基質として寄与すると考えられる。低温生理においては生体膜の正常な形成が重要であり、稲体の炭水化物が生体膜合成プロセスに対して影響を及ぼす可能性がある。北海道における過去の報告<sup>(158, 160)</sup>でも、穂ばらみ期における遮光により不稔歩合が増加した事例もあり、光合成量の減少に伴う炭水化物の不足が示唆される。

以上の結果をまとめると、筆者は「ケイ酸資材の施用→ケイ酸吸収の増加→単位面積当たりの光合成能の向上→乾物生産の増加→窒素含有量の低下・ケイ酸/窒素比の向上→炭水化物含有量の増加→充実花粉の増加・葯長の増加→冷害耐性の強化」という流れの作用があったものと考えられる。

さらに、不稔発生軽減に対して、ケイ酸の施用効果が基肥区より追肥区で高い結果となったが、その要因については、ケイ酸の吸収時期との関連が挙げられる。一般に窒素の吸収は生育初期に多く、幼穂形成期以前の吸収量が総窒素吸収量の半量以上を占めているのに

対して、ケイ酸の吸収量は分けつ期以降に増加する<sup>54)</sup>。これは、生育初期には根群が作土層に十分に伸長していないためや、水稻のケイ酸に対する要求度が地上部の乾物生産が大きくなる幼穂形成期以降に高まるためと考えられる。本試験の場合、止葉期までのケイ酸吸収量はケイ酸基肥区で、止葉期～成熟期のケイ酸吸収はケイ酸追肥区で高い傾向にあった(表37)。基肥で与えられたケイ酸は生育初期から吸収・利用されるが、土壌吸着やアンモニウムイオンとの共存による吸収抑制<sup>60)</sup>などの影響も考えられ、またケイ酸石灰の基肥は生育初期から中期にかけて効果が認められ、出穂以降の肥効は少ないと報告されている<sup>54)</sup>。したがって、ケイ酸基肥区では、初期生育の促進による乾物生産の増加とケイ酸吸収量の増加があったと考えられる。ケイ酸追肥は基肥と比較して、水稻のケイ酸要求の高い幼穂形成期以降、特に穂ばらみ期の指標である止葉期前後およびそれ以降の水稻において効率的に吸収・利用されたと考えられる。

窒素含有量の視点から見ると、止葉期の窒素含有量はケイ酸基肥区でケイ酸追肥区より高く、窒素吸収量もケイ酸基肥区で最も多い傾向にあった(表37)。成熟期の総窒素吸収量もケイ酸基肥区で多く、止葉期～成熟期の窒素吸収はケイ酸追肥区で多い傾向にあった(表37)。さらに、収量調査ではケイ酸追肥区で1穂粒数と総粒数が基肥区に勝る傾向にあり、ケイ酸基肥区で穂数と総粒数が勝る傾向であった(表39)。これらのことは、ケイ酸の基肥施用が生育初期から分けつに対する促進効果があり、茎葉も含めた総生育量が大きくなったのに対して、ケイ酸追肥の場合は主に穎花発育および退化時の稲体栄養条件を向上し、1穂粒数の増加に反映したと推察する。つまり、ケイ酸基肥区は初期から生育全体を促進し、ケイ酸栄養の向上に伴う乾物生産の向上と同時に窒素吸収も高められ、その結果、ケイ酸含有量およびケイ酸/窒素比が高まったと考えられる。ケイ酸追肥区は窒素吸収を高める効果は小さく、むしろ止葉期では窒素含有量・窒素吸収量とも統計的に有意性が認められないもののケイ酸無施用区より低い傾向にあった。それゆえ、光合成の向上に伴う乾物生産の増加や窒素の希釈効果と追肥直後のアンモニア吸収の抑制が複合して発現した可能性がある。このような作用から、不稔軽減に対しては冷害危険期の窒素含有量の抑制と炭水化物含有量の増加により、ケイ酸追肥区がケイ酸基肥区より効果的であったと判断する。

収量や産米品質については、不稔歩合の低下が精玄米収量を高め、各米粒に配分される初当たり窒素を減少することにより、白米タンパク質含有量を低下させる結果を得た。一般的には、ケイ酸含有量の高い稲の方が単位面積当たりの葉身の光合成能が高まるとされており、これは登熟期間における葉身からの過剰な蒸散を抑えることで、葉の枯れ上がりが減少したためと考えられる。これらを整理すると、(単位面積当たりの光合成能の向上)×(葉面積の増加)=(稲個体としての光合成量の増加)となる。光合成量が高まることは、通常ならば屑米や青未熟米となって捨てられていた粒も充実した良質粒となることで、収量の増加・品質の向上をもたらすものと推察される。また、玄米白度は良質粒歩合と正の相関関係が認められる。これは、玄米白度が玄米の熟色により影響を受けることから、青未熟粒が減少し良質粒が増えることで、玄米白度が高くなることによる。したがって、ケイ酸施用によって玄米生産効率が高まることは、玄米白度の向上にも効果的であることが判明した。

次に、市販ケイ酸質肥料を用いて追肥効果を検討した。市販ケイ酸質肥料の施用は、シリカゲルによる試験と同様に稲体栄養条件の改善をもたらす、不稔発生の低減と乾物生産の向上が見られ、窒素玄米生産効率も高まることが明らかとなった。ケイ酸質肥料の追肥時期は、幼穂形成期と幼穂形成期後7日目の追肥に有意な差を認められないが、止葉期における茎部の炭水化物含有量や成熟期茎葉のケイ酸/窒素比の向上、白米タンパク質含有率の低下などで、幼穂形成期後7日目の追肥が幼穂形成期追肥の効果を上回る事例が多かった(表42, 図47, 図48)。また、ケイ酸質肥料の特性としては土壌からの窒素放出を促進し、ケイ酸追肥による葉身窒素含有量の低下効果と異なる可能性もあることから、幼穂形成期後7日目の追肥が望ましいと判断する。また、施用量については、追肥の労力を考慮すると20~40g m<sup>2</sup>程度で一定の効果が期待される。

以上のように、ケイ酸質肥料の追肥は、水稻の不稔発生の軽減と増収、産米品質の向上(白米タンパク質含有量の低下、良質粒歩合および玄米白度の向上)に有効であったが、初期生育の促進や総粒数の増加についてはケイ酸質肥料を基肥で施用した方が優る。水稻はケイ酸を100g m<sup>2</sup>近く吸収することから、20~40g m<sup>2</sup>程度のケイ酸質肥料(ケイ酸成分20~30%)の追肥だけでケイ酸吸収量を十分に満たすことはできない。したがって、筆者はケイ酸質肥料を基肥で与えた上で、





さらに安定・高品質な米づくりのためにケイ酸質肥料の追肥を行うべきであるとする。

#### 6-4 まとめ

これまで述べてきた結果をまとめて、図50に示した。現状の課題は、土壌の酸化容量や可給態のケイ酸肥沃度の不足や、稲わら残渣のすき込み、窒素吸収時期の遅れなどが、初期生育の不足や不稔による収量構成要素の不足と玄米生産効率の低下に反映し、高白米タンパク質含有量に代表されるような産米品質への悪影響を与えると考えられる。北海道産米の地位向上のためには、品質の向上、特に低タンパク質米の生産が必須要因となる。これに対する対応策としては、1)客土および資材施用による土壌酸化容量（特に遊離酸化鉄）およびケイ酸肥沃度の向上することで土壌環境を改善し、初期生育に重要な根活性の向上を図る。さらに、2)稲わら残渣の浅耕による秋混和处理、3)幼穂形成期前の適度な落水管理、4)排水能の高い心土破碎の活用により、土壌還元と生育阻害物質の悪影響を抑制する。窒素施肥に関しては、5)窒素施肥における側条施肥の推奨、6)止葉期以降における窒素追肥の中止により、生育前半の窒素吸収促進と収量構成要素の増大、生育後期の窒素吸収を図る。窒素以外の成分としては、7)ケイ酸の幼穂形成期7日後追肥により、冷害危険期の稲体栄養条件の改善を行うことで、不稔発生を軽減する。これにより、移植後の初期生育（分けつ、穎花形成）を確保し、生育の中期では形成された分けつや穎花のロスを少なくし、玄米生産効率の高い稲、ひいては低タンパク質米生産が促進されると判断する。

## 第7章 要約

本研究の目的は、低タンパク質米を主眼に置いた高品質米生産のための肥培管理技術を確立することである。始めに、水稲生産基盤である北海道の水田土壌化学性の実態と課題を明らかにした。次に、圃場有機物（稲わら残渣）分解に伴う初期生育の阻害要因について明らかにするとともに、その対策技術を確立した。さらに、初期生育向上と窒素玄米生産効率の高い水稲生育を目指して、窒素とケイ酸の施用方法について検討した。

### 1. 水田土壌の実態と課題

北海道の水田1578筆の作土を採取・分析し、その化学性を評価した。pH (H<sub>2</sub>O) は4.5~6.9の範囲に分布し、土壌診断基準の下限値以下の土壌が約半数あった。培養窒素は1~293mg kg<sup>-1</sup>の範囲に分布し、平均値99mg kg<sup>-1</sup>であった。有効態リン酸の平均値は500mg kg<sup>-1</sup>、土壌診断基準の下限値のほぼ5倍とリン酸の蓄積が認められた。交換性カルシウムは510~5400mg kg<sup>-1</sup>の範囲に分布し、平均値1985mg kg<sup>-1</sup>であった。交換性マグネシウムは80~3320mg kg<sup>-1</sup>の範囲に分布し、平均値574mg kg<sup>-1</sup>であった。カルシウムは低濃度領域に多く分布しており、土壌酸性化の要因と考えられる。培養ケイ酸（湛水保温静置法）は34~290mg kg<sup>-1</sup>の範囲に分布し、平均値103mg kg<sup>-1</sup>であった。また、100mg kg<sup>-1</sup>以下の不足域にある土壌が51%認められ、特に台地土系で低い傾向にあった。遊離酸化鉄は4.2~106.2g kg<sup>-1</sup>の範囲に分布し、平均値18.6g kg<sup>-1</sup>、易還元性マンガンは15~2272mg kg<sup>-1</sup>の範囲に分布し、平均値278mg kg<sup>-1</sup>であった。特に遊離酸化鉄は46%が診断基準の下限値を下回っており、火山性土系で低く、地域的には中央部太平洋岸で低い傾向にあった。

以上のことから、北海道の水田土壌の問題点としては①低pH、②ケイ酸供給力の不足、③酸化容量である遊離酸化鉄の不足が挙げられ、良食味米生産のためにはこれらを重点的に改善すべきと判断する。

ケイ酸の不足は稲体の健全性および登熟能力の観点から、遊離酸化鉄の不足は湛水後の土壌の還元進行や硫黄とのバランス (Fe/S) の関係から重要な課題であり、本試験では客土およびケイ酸・含鉄資材施用を試みた。その結果、土壌ケイ酸肥沃度の増進は、水稲体中のケイ酸濃度を高め、白米中のタンパク質含有量を

低下させた。また、土壌の遊離酸化鉄濃度の増加が、根活性の向上と水稲の茎数増加をもたらし、最終的には精玄米収量の増加とタンパク質含有量の低下が認められた。遊離酸化鉄濃度の適正值に関しては、全硫黄濃度0.8g kg<sup>-1</sup>以下の水田土壌における遊離酸化鉄の適正水準を20g kg<sup>-1</sup> (Fe/Sモル比10) とし、全硫黄濃度0.8g kg<sup>-1</sup>以上の水田土壌の場合には遊離酸化鉄濃度が20g kg<sup>-1</sup>以上であっても、Fe/Sモル比10を目標に遊離酸化鉄濃度を高めるべきと判断した。

### 2. 圃場有機物の管理

水稲に対する初期生育の抑制要因の一つとして、有機物（稲わら残渣）の還元的分解による根伸長阻害物質、具体的には芳香族カルボン酸（安息香酸、2-フェニルカルボン酸、3-フェニルカルボン酸）の影響が認められる。本試験は、北海道の土壌と稲わらを用いた培養試験を行い、分解生成される土壌中の芳香族カルボン酸の消長を、温度条件や土壌特性、有機物前歴の観点から検討した。稲わら無添加処理では、安息香酸が少量検出されたのみで、他の成分は検出されなかった。稲わら添加条件においては、各芳香族カルボン酸が検出され、そのピークは30℃で10日頃（積算温度300℃）、20℃で13日~20日頃（積算気温260℃~400℃）であった。特に、2-フェニルプロピオン酸は、泥炭土壌および褐色低地土の一部において、水稲の窒素吸収阻害を引き起こす濃度である1μM前後まで高まった。各芳香族カルボン酸濃度は、有機物の連用土壌において低下する傾向にあった。遊離酸化鉄を多く含む土壌の客土（6cm）処理を行った土壌は、各種芳香族カルボン酸濃度の顕著な低下が認められた。このように、有機物由来の芳香族カルボン酸生成は、稲わら残渣量や土壌の前歴が大きく影響し、水稲初期生育にも関与していると推察される。

次に、稲わら残渣からの有害物質の対策技術に関して、湛水以前における稲わらの好氣的分解を促進することにより、湛水後の分解基質を減少する方法及び湛水期間中における土壌の還元を抑制することなど、有害物質の排除を行う方法について検討した。稲わらの好氣的分解に関しては、培養試験において5℃の低温条件下でも進行し、この温度条件では窒素肥料および微生物由来の分解促進資材の添加により一層分解が促

進された。深さ 8cm 程度の浅耕による稲わらの秋混和は春混和（秋散布後、地表面に放置）と比較して冬期間の分解が進み、これに窒素肥料および微生物由来の有機物分解促進資材を稲わら秋散布時に添加することでさらに促進された。冬期間および水稲栽培期間における稲わら中の炭素含有率の変化を見ると、水稲収穫時までの炭素減少率は60%程度で各処理区間差は小さく、湛水期間の分解量は春耕起までの炭素減少率が低い場合に高まる傾向にあった。

幼穂形成期前（6月下旬～7月初旬）における間断灌漑は、土壌還元を抑制し、水稲の生育に有効であった。間断灌漑処理の強度については、作土の水分がpF1.8以上になる場合に効果が高かった。圃場に対する排水性の改善技術に関しては、暗渠排水に対する新たな補助工法である砂充填細溝心土破碎（砂心破）を開発し、細かい排水溝を圃場全体に密に形成することを試みた。砂心破処理区は、湛水期間の縦浸透量および暗渠排水量が増加し、落水後の作土水分低下が認められた。さらに、浸透水量の増加に伴う酸素の供給は、湛水期間における土壌還元を抑制する技術として有効であり、根圏環境の改善に効果が認められた。

### 3. 窒素の施用方法

白米タンパク質含有量の変動は水稲の窒素吸収の影響が非常に大きく、水稲の窒素吸収量は窒素施肥量と施肥法に深く関係していることから、重窒素標識硫酸を用いた水稲の窒素施肥法に関わる試験を行い、水稲への利用率、稲体各器官における分配及び白米タンパク質含有量に及ぼす影響について検討した。

全層施肥の窒素利用率は32.4～41.2%であり、窒素施肥量の増加とともに利用率や白米タンパク質含有量が高まった。また、全量全層施肥窒素 8g m<sup>2</sup>区において吸収された施肥窒素の分配率は茎葉部36.5%、穂部63.5%であり、白米には45.4%が集積した。全層+表層施肥は白米タンパク質含有量を低下させるが、全量全層施肥および全層+側条施肥よりも窒素利用率が低く、収量性が劣っていた。側条施肥の窒素利用率は全量全層施肥より高いが、その吸収は止葉期以前に集中しており、穂および白米への分配率が全量全層施肥と比較して低いことから、白米タンパク質含有量は低かった。

幼穂形成期～幼穂形成期後7日目の窒素追肥は白米への利用率が小さいため、白米タンパク質含有量に与

える影響は小さい反面、追肥による増収効果が認められた。止葉期の窒素追肥は追肥窒素の利用率および白米への利用率が高く、白米タンパク質含有量を高めることが認められた。これらの傾向は、基肥窒素量の多少に関わりなく、ほぼ同様に認められた。出穂期以降の窒素追肥は、出穂期～出穂期後10日目の間で追肥窒素の利用率および白米タンパク質含有量が最も高くなり、それ以降は漸減した。追肥窒素の穂部への分配も出穂期をピークにそれ以降で低下し、追肥が遅くなると稈・葉鞘への分配が高まった。

全量全層施肥された窒素の次年度以降の利用率は、2年目が2.9～4.0%、3年目が1.3～1.8%、3カ年を合計した窒素利用率は41.9～48.6%であった。3カ年の利用率をプロットし、その回帰曲線から推定される4年目以降の利用率は全ての施肥窒素用量で1%以下となり、水稲への影響は極めて小さい。また、施肥後3年目でも、施肥された窒素のうち20%近くが土壌に残存していた。

以上のことから、低タンパク質米の生産には、施肥窒素量の適正化を図るとともに生育初期の窒素吸収を促進させる側条施肥を組み合わせることが合理的と判断できる。追肥に関しては、玄米収量と白米タンパク質含有量を勘案した場合、止葉期以降の追肥は行わず、幼穂形成期後7日目に追肥を行うことが効果的と判断する。

### 4. ケイ酸の施用方法

窒素施肥とケイ酸（シリカゲル）施肥の組み合わせに関して、水田圃場試験と人工気象室におけるポット試験を行い、葯の成長と不稔発生に及ぼす影響について検討した。その結果、水稲に対するケイ酸施用は不稔発生軽減に効果的であった。また、ケイ酸追肥区はケイ酸基肥区より止葉期基部の炭水化物含有量が高く、葯長は長く、不稔の発生を軽減した。葯長と不稔歩合の間には負の相関関係、葯長と止葉期基部の炭水化物含有量の間には正の相関関係が認められた。この傾向は、圃場試験とポット試験で共通しており、同一の回帰線で説明された。ケイ酸基肥および追肥は止葉期稲体中のケイ酸含有量、ケイ酸/窒素比を高めた。止葉期基部の炭水化物含有量とケイ酸含有量は正の相関関係、窒素含有量には負の相関関係が認められた。ケイ酸施用により精玄米収量が高まり、白米タンパク質含有量は低下した。また、ケイ酸施用は良質粒歩合の増加や玄米白度の向上にも効果的であった。特に、白米

タンパク質含有量の低下はケイ酸追肥区で大きい傾向が見られた。

市販のケイ酸質肥料の追肥効果についても検討したが、概ねシリカゲルによる試験と同様に稲体栄養条件の改善をもたらし、不稔発生の低減と乾物生産の向上が認められた。また、窒素玄米生産効率も高まることが明らかとなった。追肥時期は幼穂形成期と幼穂形成期後7日目の追肥に有意な差を認められないが、止葉期の基部炭水化物含有量や成熟期茎葉のケイ酸/窒素比、白米タンパク質含有量の低下などについて、幼穂形成期後7日目の追肥が幼穂形成期追肥の効果を上回る事例が多かったことから、幼穂形成期後7日目の追肥が望ましいと判断する。また、施用量については、追肥の労力を考慮すると20~40g m<sup>2</sup>程度で一定の効果が期待される。

##### 5. 産米品質向上に関する対策技術のまとめ

以上のことを整理すると、白米タンパク質の高含有量に代表される北海道産米の品質の問題は土壌酸化容量（主に遊離酸化鉄）や可給態ケイ酸肥沃度の不足や、稲わら残渣のすき込みに伴う土壌還元と有害物質生成、窒素吸収時期の遅れなどによる水稻初期生育不足や生育中期の不稔による収量構成要素の不足、生育後期の窒素玄米生産効率の低下などによって引き起こされており、これらの改善が現状の課題と考えられた。

本試験では、これらに対する対応策を検討し、得られた知見から以下のことを提案する。

- 1) 客土および資材施用による土壌酸化容量（特に遊離酸化鉄）およびケイ酸肥沃度の向上
- 2) 稲わら残渣の浅耕による秋混和处理
- 3) 幼穂形成期前の適度な落水管理
- 4) 排水能の高い心土破砕法の活用
- 5) 窒素施肥における側条施肥の推奨
- 6) 止葉期以降における窒素追肥の中止
- 7) ケイ酸の幼穂形成期後7日目追肥

## 引用文献

- 1) 星野達三：北海道の稲作 北海道稲作の歴史的発展とその背景, p. 1~84, 北農会, 札幌 (1994)
- 2) ホクレン：北海道のお米2004, p. 6~7, 札幌 (2004)
- 3) 北海道農業試験研究機関創立100周年記念行事記念誌出版委員会編：北海道農業技術研究史1981~2000, p. 17~54, p. 264~267, 北海道農業研究センター・北海道立農業試験場, 札幌 (2002)
- 4) 稲津脩：北海道産米の食味向上による品質改善に関する研究, 北海道立農試研報, 66, 1~89 (1988)
- 5) 稲津脩：北海道農業と土壌肥料1999 III-2-5米の品質管理, p. 82~86, 北農会, 札幌 (1999)
- 6) 北海道米高水準食味確立緊急対策協議会：北海道米の食味向上栽培マニュアル, p. 1~2, 北海道米麦改良協会, 札幌 (2004)
- 7) 五十嵐俊成：業務用米の実需者ニーズと産地対応-北海道産米を中心に-, フードシステム研究, 11, 16~27 (2004)
- 8) 五十嵐俊成・安積大治・竹田一美・島田悟：北海道米のタンパク質含有率に及ぼす栽培条件の影響, 北農, 72 (1), 16~25 (2005)
- 9) 稲津脩：北海道農業と土壌肥料1999, 米の品質管理 1) 良食味の条件と施肥管理, p. 82~86, 北農会, 札幌 (1999)
- 10) 宮森康雄：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, 69, 696~700 (1996)
- 11) 稲津脩：北海道の稲作 米の食味, p. 305~321, 北農会, 札幌 (1994)
- 12) 藤村稔彦編：きらら397の1等米生産, p. 12~25, 農文協, 東京 (1991)
- 13) 古山芳広：北海道農業と土壌肥料1987, 水稻の栄養生理と施肥, p. 322~333, 北農会, 札幌 (1987)
- 14) 佐々木忠雄：北海道の良質米生産技術 第7章倒伏, P. 58~63, 農業技術普及協会, 江別 (1987)
- 15) 古山芳広・藤原耕治・南松雄：水稻品種の栄養生理的特性に関する研究 III. 15Nトレーサー法により施肥窒素の吸収利用特性, 北海道立農試集報, 30, 32~44 (1974)
- 16) 中鉢富夫・川島典子・武田良和・山家いづみ：土壌型と追肥時期が玄米窒素濃度に及ぼす影響, 東北農業研究, 46, 83~84 (1993)
- 17) 木田揚一・森下光宏：重粘土地帯における水稻コシヒカリの早期栽培に関する研究, 静岡県農業試験場研究報告, 37, 1~2 (1993)
- 18) 熊谷勝巳・富樫政博・上野正夫・田中伸幸：水稻の高品質, 書力安定栽培における窒素施肥法に関する研究, 第3報玄米窒素濃度の年次変動, 東北農業研究, 45, 35~36 (1992)
- 19) 農林水産省統計情報部：第76次農林水産省統計表 (1999~2000), 110~111 (2002)
- 20) 橋本均：現代土壌肥料学の断面-土壌調査事業の概要とその情報デジタル化の現況-, 農業及び園芸, 76 (1), 61~68 (2001)
- 21) 久津那浩三, 飯田周治, 新村善男, 上森晃, 瀬川篤忠：水田の基盤に関する研究 (第1報) 土壌の理化学性の変動とこれが水稻の生育におよぼす影響, 土肥誌, 43, 165~171 (1972)
- 22) 橋本均・志賀弘行・安積大治・木場稔信・宮脇忠：北海道耕地土壌の理化学性の実態とその推移-土壌環境基礎調査の中間報告-, 北農, 65, 172~182 (1998)
- 23) 高橋和夫・野中邦彦：水田土壌中の有効態ケイ酸の測定法, 土肥誌, 57, 515~517 (1986)
- 24) 高橋英一：稲学大成 ケイ酸の吸収と生理, p. 321~331, 農文協, 東京 (1990)
- 25) 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 (3), 248~251 (1991)
- 26) 古山芳広：新時代の土づくりと施肥技術 (水稻編) 第3章水稻の栄養生理と施肥, p. 59~87, 農業技術普及協会, 江別市 (1987)
- 27) 北海道農政部：低蛋白米生産のための稲体及び土壌のケイ酸指標, 平成7年普及奨励ならびに指導参考事項, p. 267~269, 札幌 (1995)
- 28) 水野直治：北海道の稲作 IX秋落水田, p. 60~68 北海道協同組合通信社, 札幌 (1992)
- 29) 志賀一：湛水土壌中における硫化水素の行動に関する研究, 北海道大学学位論文, 1~247 (1962)
- 30) 水野直治：酸性硫酸塩土壌客入地の改良と硫黄の動態, 北農, 56 (9), 36~41 (1989)
- 31) 水野直治・丸山孔一・稲津脩：1926年十勝岳泥流水田土壌のイオウと鉄の含有率, 土肥誌, 63, 677

- ～683(1992)
- 32) 上富良野町：十勝岳泥流地帯の化学的特性，p. 1～88(1995)
- 33) 柳原哲司，宮森康雄，稲津脩，谷口健雄：泥炭地水田に対する客土の食味向上効果 (1) 客土材中ケイ酸の特異性とケイ酸供給源としての役割，道立農試集報，63，61～69(1991)
- 34) 土壌養分分析法委員会：土壌養分分析法，p. 29～257，p. 316～324，養賢堂，東京(1970)
- 35) 農林水産省農蚕園芸局農産課：土壌環境基礎調査における土壌，水質及び作物体分析法，p. 11～126，東京(1979)
- 36) 土壌標準分析・測定法編集委員会：土壌標準分析・測定法，p. 86～94，p. 118～165，博友社，東京(1986)
- 37) 北海道立農業試験場・北海道農政部農業改良課：土壌および作物栄養の診断基準—分析法—，p. 52～87，札幌(1992)
- 38) 北海道農政部・北海道立農業試験場・北海道農業試験場：北海道土壌診断基準と施肥対応，p. 4，p. 27，札幌(1999)
- 39) 南松雄・土居晃郎：北海道産米の品質に関する物理化学的研究 第2報米の食味特性と蛋白含有量との関係，北海道立農試集報，26，49～58(1973)
- 40) 北海道農政部・北海道立農業試験場：低蛋白米生産をめざした水田土壌窒素診断の手引き，p. 1～25，札幌(1998)
- 41) 吉田稔，伊藤信義：水田土壌の置換性カチオン組成と酸化に伴う土壌の酸化，土肥誌，45，525～528(1974)
- 42) 水野通治：蛇紋岩土壌の化学的特性と農作物の生理障害に関する研究，北海道立農試研報，29，7～25(1979)
- 43) 坂上行雄：本邦水田土壌の地力窒素に対する玄米重の依存性：土肥誌，46，275～279(1975)
- 44) 北海道立上川農業試験場・北海道立中央農業試験場：低タンパク米生産から見た窒素分追肥法の評価，平成7年度北海道農業試験会議資料，p. 5～8(1996)
- 45) 志賀一一，山口紀子：寒地稲作における土壌の磷酸肥沃度及び磷酸施肥の効果に関する研究 第3報窒素施肥量及び年次変動との関係，北農試研報，116，139～155(1976)
- 46) 鎌田賢一：北海道の農耕地における有機物施用量および化学肥料施用量の推移と今後の展望，北農，69，235～246(2002)
- 47) 南條正己：多様な水稻栽培方式における水田土壌肥料の現状と方向—1. 水田土壌における養分動態研究の進歩，その2—リン酸—，土壌誌，67，317～321(1996)
- 48) 津高寿和，砂野正，田中平義：土壌型別のリン酸の形態，土壌誌，55，415～420(1984)
- 49) 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，62，247～251(1991)
- 50) 竹内徹：イネの窒素およびケイ酸栄養といもち病抵抗力との関係，北日本病害虫研究会報，48，23～26(1997)
- 51) 白井佳代，竹内徹，竹内晴信，清水基滋，宮森康雄：イネ葉鞘褐変病の被害解析とイネ茎葉中のケイ酸および窒素濃度が発病に及ぼす影響，北日本病害虫研究会報，50，43～46(1999)
- 52) 住田弘一：多様な水稻栽培方式における水田土壌肥料研究の現状と方向1. 水田土壌における養分動態研究の進歩・その3—ケイ酸—，土肥誌，67，435～439(1996)
- 53) 近藤錬三：植物珪酸体 (Opal Phytolith) からみた土壌と年代，ペドロジスト，32，189～203(1988)
- 54) 住田弘一，大山信雄：水稻のケイ酸吸収促進に及ぼす有機物およびケイ酸カルシウム施用効果，土肥誌，62，386～392(1991)
- 55) 浅見輝男：水田土壌中における遊離鉄の行動に関する研究 (第1報) 水田土壌中における遊離鉄の還元と土壌有機物，土肥誌，41，1～6(1970)
- 56) 鈴木新一，志賀一一：秋落水田土壌の理化学的特性に関する研究 (第2報) 硫化水素発生能と秋落との関係，中国農業試験場報告，3，69～80(1956)
- 57) 鈴木新一，志賀一一：湛水土壌中における硫化水素の行動に関する研究 (第3報) 種々の形態の含鉄材並びに客土材添加による硫化水素発生の抑制について，中国農業試験場報告，2，73～90(1953)
- 58) 北海道立農業試験場・北海道農政部農業改良課：水稻に対する素わら施用の影響に関する試験，昭和40年農業技術普及資料，p. 230～241(1965)
- 59) 北海道農政部：米に関する資料，p. 58～60(2001)
- 60) 志賀一一，大山信夫，鈴木正昭：二毛作水田における水稻の異常穂発生の原因，土肥誌，54，383～388(1983)
- 61) 前田要・南松雄：強粘質水田土壌の物理・化学的特性と生産力向上に関する研究 V. 稲わら施用に

- 伴う水稲の初期生育阻害要因の解析, 北海道農業試験場集報, 46, 41~49 (1981)
- 62) 脇本賢三・梶本晶子・伊藤信: 近畿中国地方における水稲の異常穂発生実態と土壌条件の解析, 中国農業試験場報告, 5, 45~63 (1989)
- 63) 六本木和夫・秋本俊夫・鈴木清司: 水稲異常生育に対する回避対策について, 土肥誌, 57, 80~84 (1986)
- 64) 片岡孝義・松尾喜義・金忠男・小松良行: 水稲の青立ちの発生要因 (第1報) 麦わらすき込みによる青立ちの発生, 日作紀, 52, 349~354 (1983)
- 65) 田中福代・小野信一: 有機物資材を施用した水田土壌における芳香族カルボン酸の集積と起源および水稲の生育阻害, 土肥誌, 71, 350~355 (2000)
- 66) 田中福代: 水田への麦わら施用に伴う芳香族カルボン酸の生成と水稲の生育抑制機構に関する研究, 土肥誌, 72, 335~336 (2001)
- 67) 野村美智子: 褐色低地土水田における有機物の長期連用効果 (第1報) 水稲の生育・収量・食味に与える影響, 北農, 64, 175~181 (1997)
- 68) 野村美智子: 褐色低地土水田における有機物の長期連用効果 (第2報) 土壌の理化学性に与える影響, 北農, 64, 276~282 (1997)
- 69) 前田要: 北海道の強粘質水田の理工学特性と排水不良対策に関する研究, 北海道立農業試験場報告, 42, 4~43 (1983)
- 70) 前田要: 北海道農業と土壌肥料1987 第4章水田土壌管理と水稲施肥, p.297~308 (1987)
- 71) 橋本均: 21世紀への農業基盤づくり 3. 土地基盤の現状と問題点, 北農, 64, 126~129 (1997)
- 72) 小林荘司・水元秀彰: 強粘質水田の排水法改善に関する研究 第1報 モミガラ暗渠とパンプレーカーの併用効果, 北海道農業試験場集報, 28, 33~44 (1973)
- 73) 前田要・南松雄: 強粘質水田土壌の物理・化学的特性と生産力向上に関する研究 II. 排水不良田の水管理, 北海道農業試験場集報, 37, 25~34 (1977)
- 74) 前田要・南松雄: 強粘質水田土壌の物理・化学的特性と生産力向上に関する研究 IV. 排水性の向上が水稲の初期生育に及ぼす影響, 北海道農業試験場集報, 44, 1~11 (1980)
- 75) 北海道農政部: 北海道における暗渠排水の実態と機能向上対策, 平成12年普及奨励ならびに指導参考事項, p. 266~269, 札幌 (2000)
- 76) 陽 捷行・八木一行: 水田から発生するメタンのフラックスの測定法, 土肥誌, 59, 458~463 (1988)
- 77) 土壌環境分析法編集委員会編: 土壌環境分析法, p. 129~138, p. 197~199, 博友社, 東京 (1997)
- 78) 陽 捷行: 土壌圏と大気圏, p. 2~83, 朝倉書店, 東京 (1994)
- 79) 長谷川周一・粕淵辰昭: 携帯用デジタルマノメータ利用による土壌水分吸引圧の測定, 土壌の物理性, 58, 49~51 (1988)
- 80) 田中福代: 水田への麦わら施用に伴う芳香族カルボン酸の生成と水稲の生育抑制機構に関する研究 (学位論文), 農業研究センター, (2000)
- 81) 北田敬宇: 水田から発生する温室効果ガスの制御技術の試案, 農業技術, 46, 302~306 (1991)
- 82) 木村真人・村瀬潤: 水田土壌におけるCO<sub>2</sub>とCH<sub>4</sub>の動態—大気へのフラックス—, 土壌の物理性, 65, 11~20 (1992)
- 83) Chidthaisong, A. and Watanabe, I.: Methane formation and emission from flooded rice soil incorporated With <sup>13</sup>C-labeled rice straw. *Soil Biol. Biochem.*, 29, 1173~1181 (1997)
- 84) Yagi, K., and Minami, K.: Effect of organic matter application on methane emission from some Japanese paddy field. *Soil Sci. Plant Nutr*, 36(4), 599~610 (1990)
- 85) Watanabe, A., Katoh, K. and Kimura, M.: Effect of rice straw application on CH<sub>4</sub> emission from paddy fields. II. Contribution of organic constituents rice straw. *Soil Sci. Plant Nutr*, 39 (4), 707~712 (1993)
- 86) 北海道立中央農業試験場監修: やさしい施肥管理の手引き—水稲編—, p. 29~34, ホクレン, 札幌 (2003)
- 87) 久保田勝: 新潟県における湿田・半湿田に対する稲わらの施用法に関する研究, 新潟農試研報, 39, 1~87 (1992)
- 88) 種市温美・黒田農・小野剛志: 黄色重粘土水田における稲わら分解促進剤の施用効果, 東北農業研究, 45, 79~80 (1992)
- 89) 北海道立上川農業試験場: 地力培養による寒冷型気象下の稲作安定良質技術の確立に関する試験成績書, p. 49~71 (1980)
- 90) 宮田明: 気象資源としての雪と農業, 北海道の農業気象, 40, 109~114 (1988)



- 91) 佐久間俊雄：北海道農業と土壌肥料1987 北海道の自然, p. 9~25, 北農会, 札幌 (1987)
- 92) 北海道立農業試験場・北海道農政部農業改良課：水稲に対する素わら施用の影響に関する試験, 昭和40年農業技術普及資料, p. 230~241 (1965)
- 93) 木村真人・村瀬潤：水田土壌におけるCO<sub>2</sub>とCH<sub>4</sub>の動態—大気へのフラックス—, 土壌の物理性, 65, 11~20 (1992)
- 94) 松本次郎・南山泰宏・赤堀伸・高橋克征：有機物施用水田におけるメタンの発生軽減対策, 土肥誌, 71, 315~318 (2002)
- 95) 木村真人：水田から発生するメタンの起源とその土壌中での動態, 土肥誌, 69, 231~234 (1998)
- 96) 久保田勝・高橋英夫：北陸地方の重粘土水田における稲わら分解, 同上, 55, 36~42 (1984)
- 97) 農林水産技術会議事務局編：農耕地における土壌有機物変動の予測と有機物施用基準の策定, 研究成果, 166, p. 38~46 (1985)
- 98) Watanabe, A., atoh, K. and Kimura, M. : Effect of rice straw application on CH<sub>4</sub> emission from paddy fields. I. Effect of weathering of rice straw in the field during off-crop season. *Soil Sci. Plant Nutr.* 39(4), 701~706(1993)
- 99) 石橋英二・赤井直彦・糸島康裕・川中弘二・柳井雅美：岡山県における水田からのメタン発生に及ぼす土壌型並びに水管理の影響, 同上, 68, 417~422 (1997)
- 100) 陽 捷行：土壌圏と大気圏, p. 2~83, 朝倉書店, 東京 (1994)
- 101) 北海道農政部：稲わら施用田における中干しを中心とした初期生育の改善対策, 平成元年普及奨励ならびに指導参考事項, p. 291~293 (1989)
- 102) 川口桂三郎：水田土壌学, p. 73~90, 講談社, 東京 (1978)
- 103) 日本土壌肥料学会編：水田転作—田畑の高度利用—, p. 5~22, 博友社, 東京 (1979)
- 104) 山根一郎・浜田竜之介・吉永長則・浅見輝男・松田敬一郎・佐久間敏雄・小林達治・湯村義男：土壌学, p. 104~112, 文永堂出版, 東京 (1984)
- 105) 前田要・南松雄：強粘質水田土壌の物理・化学的特性と生産力向上に関する研究Ⅲ. 水管理法の改善が水稲収量性に及ぼす影響, 北海道農業試験場集報, 40, 19~28 (1978)
- 106) 北海道農政部：強粘質水田の排水法改善, 昭和49年普及奨励ならびに指導参考事項, p. 36~38, 札幌 (1974)
- 107) 石間紀男・平宏和・平春枝・御子柴穆・吉田誠次：米の食味に及ぼす窒素施肥および精米中のタンパク質含有率の影響, 食糧総合研究所報告, 29, 9~15 (1974)
- 108) 清藤文仁・中堀登示光・高城哲男・小山田善三：白米のタンパク質含有率と食味評価及び施肥法との関係, 東北農業研究, 45, 31~32 (1992)
- 109) 日本土壌肥料学会編：施肥位置と栽培技術—現状と問題点—, p. 139~194, 博友社, 東京 (1982)
- 110) 廣川智子・北川靖夫・伊藤純雄：各種土壌における施肥窒素及び土壌窒素のコシヒカリによる吸収とその変動要因について, 富山農業技セ研報, 13, 11~20 (1992)
- 111) 西潟高一・藤森信四郎・藤森利夫・藤田勇・首藤良一：水稲の施肥法について, 北農, 27 (8), 9~18 (1960)
- 112) 坂本宣崇・古山芳広・岩淵晴郎：寒地水田における移植後の気温と表層施肥効果の発現との関係, 北海道立農試集報, 53, 51~60 (1985)
- 113) 北海道農務部：水稲に対する粒状化成の側条施肥効果, 昭和59年普及奨励ならびに指導参考事項, P. 323~327 (1984)
- 114) 土居晃郎・古山芳広：水稲に対する側条施肥の表層施肥効果, 北農, 52 (1), 45~56 (1985)
- 115) 大山信雄：東北地方における水稲側条施肥の肥効, 農業技術, 42, 49~53 (1987)
- 116) 三浦周・坂本宣崇・古山芳広：寒地における側条施肥水稲に対する窒素追肥の影響, 北海道立農試集報, 63, 31~39 (1991)
- 117) ホクレン：やさしい施肥管理の手引き—水稲編—, p. 50~55, 札幌 (1991)
- 118) 北海道農政部：中苗機械移植水稲の施肥法, 昭和57年普及奨励ならびに指導参考事項, p. 323~327 (1982)
- 119) 志賀一一：北海道の稲作. 第3章 第5節 水田の土壌肥料. p. 256~275, 北農会, 札幌 (1994)
- 120) 黒川春一・藤村稔彦：水稲に対する窒素分施について, 北農, 31 (3), 4~8 (1964)
- 121) 北海道農政部：窒素吸収特性から見た「ゆきひかり」の耐倒伏性, 昭和61年普及奨励ならびに指導参考事項, p. 351~355 (1986)
- 122) 北海道農政部：冷害対策としての水稲に対する

- 窒素分肥に関する試験, 農業技術普及資料, 6 (4), 102~110(1963)
- 123) 石塚喜明: 寒冷地における水稲栽培 第5章 土壌肥沃度の調整と施肥, 北農, 46(9), 8~18 (1979)
- 124) 廣川智子・伊藤純雄・北川靖夫: 水稲による施肥窒素の吸収利用率と施肥後の気温および日照との関係, 富山県農業技術センター研報, 10, 11~17(1991)
- 125) 本庄一雄・平野貢: 米のタンパク含有率に関する研究 第3報 登熟に伴う体内窒素および穂揃期追肥窒素の穂への移行, 日作紀, 48, 517~524(1979)
- 126) 中根良平: 質量分析法による同位体比測定Ⅲ, 質量分析, 22, 51~56(1963)
- 127) Jenkinson,D.S.,Fox,R.H. and Rayner,J.H. : interactions between fertilizer nitrogen and soil nitrogen -the so-called 'priming' effect. *J. Soil Sci.*, 36, 425~444(1985)
- 128) 渡辺巖: 水田土壌における有機物の動態 [5] 土壌窒素代謝研究に重窒素使用するときの問題点, 農及園, 63(12), 1348~1352(1988)
- 129) 有馬康紘: 稲学大成第2巻一生理編一 窒素の吸収, p. 247~253, 農文協, 東京(1990)
- 130) 古原洋・渡辺祐志・竹内晴信・田中英彦・丹野久・五十嵐俊成・後藤英次・長谷川進・沼尾吉則: 北海道米の食味・白度の変動要因解析と高位安定化技術, 北農, 69(1), 17~25 (2002)
- 131) 川田信一郎著: イネの根, p. 12~21, 農文協, 東京(1982)
- 132) 巽二郎: 根の辞典, ソース~シンク関係から見た地上部-地下部関係, p. 117~118, 朝倉書店, 東京 (1998)
- 133) TATSUMI,J. and Y.KONO :Translocation of Foliar-Applied Nitrogen to Rice Roots, *J.Crop.Sci.* 49, 302~310(1981)
- 134) 田中明・藤田耕之輔: トウモロコシの栄養生理学的研究 乾物生産における Source と Sink の相対的意義, 土肥誌, 42, 152~156 (1971)
- 135) 石塚喜明・田中明: 水稲の栄養生理, p. 213~219, 養賢堂, 東京 (1969)
- 136) 松崎昭夫: 稲学大成第2巻一生理編一 穂の発育と老化, p. 109~120, 農文協, 東京 (1990)
- 137) 折谷隆志: 稲学大成第2巻一生理編一 老化のメカニズム, p. 109~120農文協, 東京 (1990)
- 138) 前忠彦: 作物の生長と窒素の転流 (6) -水稲の生長と窒素の転流-, 農業および園芸, 57, 978~984 (1982)
- 139) 佐竹徹夫: 北海道の稲作 水稲の冷害, p. 203~215, 北農会, 札幌 (1994)
- 140) 北海道統計情報事務所編: 北海道の冷害, p. 1~8, 北海道農林統計協会協議会, 札幌 (1994)
- 141) 和田定著: 水稲の冷害, p. 40~70, 102~106, 225~229, 養賢堂, 東京 (1992)
- 142) 西山岩男著: イネの冷害生理学, p. 161~197, 北海道大学図書刊行会, 札幌 (1985)
- 143) 日本農業気象学会編: 平成の大凶作, p. 169~193, 農林統計協会, 東京 (1994)
- 144) 天野高久・森脇良三郎: 水稲の冷害に対する栽培学的研究第2報穂孕期不稔に関する葉身の限界窒素含有率, 日作紀, 53 (1), 1~6(1984)
- 145) Hayase,H., Satake,T., Nisiyama,I.andIto,N. : Male Sterility Caused by Cooling Treatment at the Meiotic Stage in Rice Plants. *Japan.Jour. Crop Sci.*, 38, 706~711(1969)
- 146) Nishiyama,I. : Male Sterility by Cooling Treatment at the Young Microspore Stage in Rice Plants. *Japan.Jour.Crop Sci.*, 52(3), 307~313 (1983)
- 147) 田中英彦: 水稲の不稔歩合を出穂期に葯長から予測する方法, 北農, 65 (4), 384~386 (1998)
- 148) 住田弘一: 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(1992)
- 149) 古谷勝司: 冷温による水稲の障害不稔発生に及ぼす施肥法の影響, 日作紀, 52 (別1), 147~148(1983)
- 150) 森脇勉: イネの健康を何でとらえるか, 農業および園芸, 75 (6), 705~713(2000)
- 151) 北海道農政部: 北海道施肥ガイド, p. 28, 札幌 (2002)
- 152) 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)
- 153) 藤井弘志: ケイ酸と作物生産 II 水稲の生育・収量・食味に及ぼすケイ酸の効果, p. 39~76, 博友社, 東京 (2002)
- 154) 長谷川喜代三: 食物・栄養化学シリーズ19 食品分析, p. 117~135, 培風館, 東京(1993)
- 155) 中村道徳・貝沼圭二編: 生物化学実験法19 澱粉・

- 関連糖質実験法, p. 1~13, p. 41~47, 学会出版センター, 東京(1986)
- 156) 日本食品工業学会食品分析法編集委員会：食品分析法, p. 167~189, 光琳, 東京(1982)
- 157) 酒井寛一：冷害におけるイネ不稔性の細胞組織学的ならびに育種学的研究特に低温によるタペート肥大に関する実験的研究, 北農試報告, 43, 1~44 (1948)
- 158) 和田定・國廣泰史・本間昭：水稻の減数分裂期における水温, 気温ならびに遮光などの処理が不稔歩合に及ぼす影響, 日作紀, 41, 340~347(1972)
- 159) 小池説夫：生殖成長期の冷温障害, 植物細胞工学, 6 (5), 329~335(1992)
- 160) 島崎佳郎・佐竹徹夫・渡辺潔・伊藤延男：穂孕期の昼夜温ならびに遮光処理が不稔粒発生におよぼす影響, 北農試集報, 76, 10~16(1964)
- 161) Yoshida,R and Oritani,T. : Studies on Nitrogen Metabolism in Crop Plant, *Proc.Crop Sci.Japan*, 43(1), 47~51(1974)
- 162) Osada,A.,H.Suge,Shibukawa,S and Noguchi,I. : Change of endogenous gibberellins in rice plants as affected by growth stage and different growth conditions. *Proc.Crop Sci.Japan*, 42, 41~45 (1973)
- 163) Samuelson,M.E. and Larsson,C.M. : Nitrate regulation of zeatin riboside levels in barley root: effects of inhibitors of N assimilation and comparison with ammonium. *Plant Sci.*93,77~84 (1993)
- 164) 榊原均：植物の器官間コミュニケーション, サイトカイニンを介した窒素シグナルの器官間情報伝達, 化学と生物, 37 (4) , 218~219 (1999)
- 165) 張祖建・中村貞二・西山岩男：イネの穂ばらみ期耐冷性に及ぼす相対的根量および根の生理活性の変化の影響, 日作紀, 70 (1) , 84~91 (2001)
- 166) 張祖建・中村貞二・国分牧衛・西山岩男：ジベレリンとサイトカイニンがイネの穂ばらみ期耐冷性に及ぼす影響, 日作紀, 70 (2) , 238~246 (2001)
- 167) 天野高久・森脇良三郎：水稻の冷害に対する栽培学的研究第3報穂孕期不稔に対する堆肥施用の効果, 日作紀, 53 (1) , 7~11(1984)
- 168) 高橋英一：イネのケイ酸吸収に対する共存イオンの影響, 土肥誌, 53 (4) , 271~276(1982)
- 169) 高橋英一：ケイ酸植物と石灰植物, p. 65~78, 農文協, 東京 (1987)
- 170) 日本農業気象学会北海道支部：北海道の農業気象, p. 22~23, ニューカントリー編集部, 札幌 (1982)
- 171) 田中明：北海道の稲作 北海道における水田の分布, p. 99~103, 北農会, 札幌 (1994)

# Studies on Soil chemical properties and Rational Fertilizer Application for Production of High-Quality Rice in Hokkaido

by  
Eiji Goto

## Summary

The purpose of this study is to investigate the method of manuring practice for production of high quality rice in Hokkaido. At first, I investigated the present condition of chemical properties of paddy soil in Hokkaido. Furthermore, I discussed the techniques to improve the quality of rice (especially focused on low protein content on seed) based on the following points: (a)decomposition of applying rice straw, (b)nitrogen fertilizer application method, and (c)silicate fertilizer application method.

### 1. The circumstance of chemical properties of paddy soils in Hokkaido

The circumstance of chemical properties of paddy soils were investigated on 1578-point paddy fields in Hokkaido. For the usefulness of the analysis, I interpolated the sampled field data into a 1 km grid of a digital map. The results are summarized as follows.

- 1) The pH of samples ranged from 4.5 to 6.9 and the average was 5.5. Nearly a half of the points had a value of less than the lower limit (pH 5.5) of the soil diagnosis standard of Hokkaido.
- 2) Incubation nitrogen ranged from 1 to 293 mg kg<sup>-1</sup> with the average of 99 mg kg<sup>-1</sup>.
- 3) The average available phosphate (Bray No2) was 500 mg kg<sup>-1</sup>, which was five times as much as the lower limit of soil diagnosis standard.
- 4) Exchangeable Ca ranged from 510 to 5400 mg kg<sup>-1</sup> with the average of 1985 mg kg<sup>-1</sup>. Exchangeable Mg ranged from 80 to 3320 mg kg<sup>-1</sup> with the average of 574 mg kg<sup>-1</sup>.
- 5) Incubation silica ranged from 34 to 290 mg kg<sup>-1</sup>, and the average was 103 mg kg<sup>-1</sup>. There were 51% of the points less than the lower limit of soil diagnosis standard : 100 mg kg<sup>-1</sup>. Particularly, brown lowland soil and upland soil types mostly provided lower values.
- 6) Free iron oxide ranged from 4.2 to 106.2 g kg<sup>-1</sup>, and the average was 18.6 g kg<sup>-1</sup>. The easily reducible manganese ranged from 15 to 2272 mg kg<sup>-1</sup>, and the average was 278 mg kg<sup>-1</sup>. In 46 % of the points, the free iron oxide did not reach the lower limit of standard : 15 g kg<sup>-1</sup>.

The above results suggested that the paddy soil in Hokkaido has three major problems ; low pH, lack of silica-supplying ability, and lack of the free iron oxide representing oxidation capacity. I therefore think that these problems should be solved for the production of high quality rice, because the silica is deeply related to the healthiness and the ripening of the rice plant and also the free iron oxide may play an important role in the soil reduction process after the flooding.

In this study, I attempted that the soil fertility is improved using the soil dressing or inorganic soil amendment containing the silica and the iron. The experiment provides the result that the soil with high content of silica increases the silicate concentration in the rice plants and decreases the amount of protein in the milled rice. Also the soil with a higher free iron oxide concentration activated the roots and increases the

number of the stems. I here propose a standard of free iron oxide concentration: if the total sulphur level was less than  $0.8\text{g kg}^{-1}$ , it should be above  $20\text{g kg}^{-1}$ ; Or else, it should be a value with satisfying the condition that the ratio of free iron oxide and sulphur (Fe/S) is above 10.

## 2. Management of rice straw residues in the paddy field

The application of rice straw residues generates aromatic carboxylic acids such as benzoic acid, 2-phenylpropionic acid, and 3-phenylpropionic acid, which inhibit the root growth. Firstly, in order to identify the synthesis of these products in reduced soil, I performed an incubation experiment using the rice straw residues and some paddy soils in Hokkaido.

- 1) The soil with no rice straw residues showed no aromatic carboxylic acid except for a small amount of benzoic acid.
- 2) The incubation soil with rice straw residues contains several kinds of aromatic carboxylic acid. These acids attain their peak about 10 days after incubation at  $30^{\circ}\text{C}$  and 13-20 days after incubation at  $20^{\circ}\text{C}$ .
- 3) In several peat soils and brown Lowland soils, the concentration of the 2-phenylpropionic acid attained  $1\ \mu\text{M}$ , and this concentration may inhibit nitrogen absorption by plant.
- 4) Soil dressing by free iron oxides rich soils effectively reduces the production of aromatic carboxylic acids.

Subsequently, I developed a technique to remove the growth inhibition materials in the rice straw residues. I utilized both acceleration of decomposition of the rice straw before flooding and the suppression of the soil reduction during the flooding period. The experiment was performed in Hokkaido Kamikawa Agric.Exp.Stn. (Brown Lowland soil) . Results are as follows.

- 1) In the incubation even under a low temperature ( $5^{\circ}\text{C}$ ) condition, the decomposition of rice straw progressed and it is accelerated with the application of decompositional accelerators such as nitrogen fertilizers or microbes.
- 2) The rice straws were more decomposed in a case where they were mixed in 0-8 cm soil depth in autumn. At this timing, the decomposition was accelerated by the application of microbe decompositional accelerators or nitrogen fertilizers.
- 3) The soil reduction were effectively mitigated by using an intermittent irrigation before the panicle formation stage. The intermittent irrigation was more effective when it decreased the soil moisture above pF 1.8 before the panicle formation stage.
- 4) The subsoiling filled in drain with sand, enabled to increase the amounts of the underdrainage and percolating water during the flooding period with decreasing the soil moisture. The percolating water supplied more oxygen and suppressed the soil reduction during the flooding period.

## 3. Nitrogen application method

The protein content of polished rice was deeply dependent on the amount of nitrogen absorbed by rice plants, which is resulted by the amount of fertilizers and the fertilizing methods. I therefore examined the relationship between the nitrogen fertilizer application method (incorporation to plow layers, surface layer applications, and side dressings) and the recovery rate of applied nitrogen and the distribution to each organ

of the rice plant, using the  $^{15}\text{N}$ - labeled ammonium sulphate in Hokkaido Kamikawa Agric.Exp.Stn. (Humic brown lowland soil) . The results are as follows.

- 1) The recovery rate of nitrogen incorporated to plow layers (4,8,12,16 g m<sup>-2</sup>) ranged from 32 to 41 %. The distribution rate of applied nitrogen in 8 g m<sup>-2</sup> nitrogen treatment was 36.5 % for leaves and stems, 63.5 % for ears, and 45.4 % for polished rice.
- 2) The surface layer application method combined with incorporation method to plow layer reduced the recovery rate of nitrogen, the protein content of polished rice and the yield compared with other methods.
- 3) The side dressing method combined with incorporation method to plow layer made a higher recovery rate of nitrogen than incorporation method to plow layer. In this side dressing method, protein content of polished rice was low, because the nitrogen absorption was finished before the flag leaf stage.
- 4) In the incorporation to plow layer method, the recovery rate of applied nitrogen was 2 to 4 % in the next year, and from 1 to 2 % in the third year. It was less than 1 % after the 4th year, estimated by the regression analysis. More than 20 % of applied fertilizer nitrogen was left in the soil after the third year.

I focused on the timing of the top-dressing of nitrogen and the recovery rate as follows. I added experiments using  $^{15}\text{N}$ - labeled ammonium sulphate as a top-dressing nitrogen fertilizer, in Hokkaido Kamikawa Agric. Exp.Stn. (Brown lowland soil) .

- 1) Top-dressing during the period from panicle formation stage to 7 days after panicle formation stage, the recovery rate by the polished rice and the protein content did not change significantly, while the yields was rather increased.
- 2) The nitrogen application during the flag leaf stage increased the recovery rate and the protein content of the polished rice. This result was independent of the amount of basal dressing nitrogen.
- 3) Both the recovery rate and the protein content of the polished rice were largest when the fertilizer was top-dressed from heading time to 10 days after heading time.

From above results it is summarized as follows. The combination of the side dressing method and the incorporation method to plow layer was most reasonable for the high yield and the production of low protein content rice seed. Top-dressing of nitrogen at 7 days after the panicle formation stage was needed for the production of low protein content rice seed, while that in the later stages was not recommended.

#### 4. Silica application method

I finally scrutinize the influences of the nitrogen and silicate fertilizer application on the anther length and percentage of the sterility of the rice plants as well as the rice quality using field experiment in Hokkaido Kamikawa Agric.Exp.Stn. (Brown lowland soil) and air-conditioned room experiments. The results are summarized as follows.

- 1) The application of the silicate fertilizer decreased the percentage of the sterility. Compared with the basal application, the top-dressing of the silicate fertilizer was more effective to increase the carbohydrate content increase and the anther length, and reduce of the sterility.
- 2) The anther length was negatively correlated with the percentage of the sterility and positively correlated with the carbohydrate content of the rice plants. There was no significant difference between field and

the air-conditioned room experiments.

- 3) In both basal and top-dressing cases, the silicate content of the rice plants increased at the flag leaf stage. In this stage, the carbohydrate content was positively correlated with the silicate content.
- 4) The silicate fertilizer application decreased the protein content of the polished rice seed. In particular, it encouraged the good quality grain rate and appearance quality of husked rice seed. I remarked that the top-dressing was quite effective to the low protein polished rice seed production.
- 5) The top-dressing at 7 days after the panicle formation stage was more effective, to obtain the high carbohydrate content as well as the low protein content of seed, rather than the top-dressing during the panicle formation stage. It is suggested that the reasonable top-dressing amount is 20-40 g m<sup>-2</sup>.

## 謝 辞

本論文を取りまとめに際し、北海道大学教授大崎満博士よりご指導とご助言を賜り、さらにご校閲の労をおとりいただいた。また、本論文の取りまとめにあたり、北海道大学教授荒木肇博士、北海道大学助教授信濃卓郎博士より、有益なご助言とご校閲をいただいた。元上川農業試験場土壌肥料科科长、中央農業試験場生産システム部長であられた稲津脩博士には、本研究の端緒を与えていただき、本研究の遂行と取りまとめにあたり終始ご助言と激励をいただいた。ここに深甚なる謝意を表します。

この研究を遂行するにあたり、酪農学園大学教授であられた水野直治博士、元北海道立中央農業試験場場長、拓殖大学北海道短期大であられた故・相馬暁博士、元北海道立天北農業試験場場長、帯広畜産大学教授であられた菊地晃二博士、北海道立中央農業試験場場長、現拓殖大学北海道短期大教授である下野勝昭博士には有益なご指導とご助言をいただいた。

本研究を実施するにあたり、元道立上川農業試験場研究部長木村清氏、元道立上川農業試験場土壌肥料科横井義雄氏、北見農業試験場主任研究員三浦周氏の各氏には土壌分析法について懇切なご指導をいただき、元道立上川農業試験場土壌肥料科野村美智子氏、元道立上川農業試験場栽培環境科長長谷川進氏、同栽培環境科楠目俊三氏、佐々木亮氏、中央農業試験場生産環境部副部長宮森康雄氏、同栽培環境科田丸浩幸氏、同土壌生態科櫻井道彦氏、同農業環境科北川巖氏、同技術普及部主査古原洋氏、道立道南農業試験場技術普及部主査五十嵐俊成氏、道立十勝農業試験場栽培環境科長竹内晴信氏、同管理科長田中英彦氏の各氏には、水稲試験の全般にわたり、有益なご指導とご援助をいた

だいた。

元北海道立花・野菜技術センター場長であった前田要氏、元道立中央農業試験場農業環境部長であった能代昌雄氏、今野一男氏、道立中央農業試験場環境保全部長木曾誠二氏、元農政部農業改良課首席専門技術員坂本宣崇氏には、終始激励とご助言をいただいた。

芳香族カルボン酸の分析に関しては、農林水産省農業研究センター土壌肥料部栄養診断研究室（現独立行政法人 農業・食品産業技術総合研究機構 中央農業総合研究センター）の藤原伸介室長、田中福代氏、大脇良成氏にご指導とご援助を賜った。

硫黄の分析に関しては、北海道開発土木研究所土壌保全研究室（現独立行政法人土木研究所 寒地土木研究所）石渡輝久室長、宍戸信貞氏にご協力いただいた。

重窒素の分析に当たっては、農林水産省北海道農業試験場水田土壌管理研究室（現独立行政法人 農業・食品産業技術総合研究機構 北海道農業研究センター）伊藤純雄室長、君和田健二氏にご協力いただいた。

土壌採取および現地試験の実施には、各農協・農業改良普及センター、支庁、耕地出張所、土地改良区の関係者の方々から長年にわたり多大なご便宜、ご指導をいただいた。

また、圃場試験を実施するにあたり、道立上川農業試験場管理科の各位には、長きにわたり圃場管理、水稲栽培等多くのサポートをいただいた。

以上の各位に対し、心からの敬意と感謝の意を表す。

最後に、本論文のとりまとめにあたり、ご協力と便宜を計っていただいた道立中央農業試験場岩見沢試験地 水田・転作科の各位に感謝の意を捧げる。