

12.3 地下灌漑を伴う泥炭水田輪作圃場における土壌養分制御技術に関する研究

研究予算：運営費交付金（一般勘定）

研究期間：平 23～平 27

担当チーム：寒地農業基盤研究グループ 資源保全チーム

研究担当者：横濱充宏、石田哲也、新津由紀、桑原 淳、
清水真理子

【要旨】

地下灌漑利用時の土壌養水分の動態を把握することを目的として、地下灌漑施設が整備された下層に泥炭が厚く堆積している4枚の大区画水田輪作圃場で、土壌断面調査、土壌理化学性分析、土壌水分ポテンシャル観測および米の低タンパク化を目的とした水管理（一定の間隔で給水と排水を複数回繰り返す）の前後での土中水の成分分析を実施した。その結果、地下灌漑施設を利用した低タンパク化対策による地下水位の上昇・下降は、暗渠の近傍では暗渠埋設深近くまで変動していたが、暗渠と暗渠の間での変動幅は狭いことが確認できた。そのため、圃場全体で均一に土壌の還元状態は解消しておらず、無機態窒素の硝酸化成や洗脱が期待どおりには進行していないと考えられた。また、地下水は速やかに下降していても土壌含水率の低下は大きく遅れること、水溶性の硝酸態窒素の濃度は、暗渠排水では低く、地表湛水で高いことが明らかとなった。今後は、補助暗渠や心土破碎等の組み合わせも考慮して、地下灌漑施設を利用した土壌養分制御技術を追究していく。

キーワード：地下灌漑、泥炭水田輪作、低タンパク米

1. はじめに

北海道には、全国に分布する泥炭農地約22万haの40%に相当する泥炭農地が沖積平野を主体に広く分布している。道南、道央、道北南部の泥炭農地での営農は水稻作が中核となり、国内の食料供給を担っているが、農家数の激減により、戸当たり30ha以上の大規模経営への変革が必須となってきている。大規模経営化の実現には、営農作業の省力化（地下灌漑や乾田直播などの水管理と栽培技術の導入）と、経営リスクの回避（田畑輪作による土地利用と栽培品目の汎用化）の構築が必須である。

これらの変化に対応するため、例えば北海道開発局では国営事業による圃場の大区画化と併せて地下灌漑施設の導入が進められている。地下灌漑は、排水を目的として埋設される暗渠に給水の機能を兼用させ、地下水位を上昇させて作物の根へ水分を直接に供給する手法である。水稻作では水管理の省力化、畑作では旱魃被害の防止が主たる利用方法となっている。この地下水位を制御できる機能を活用して、土壌中の水分と作物栄養成分（以下、土壌養分と表現する）を制御し、作物の品質の向上（たとえば、米粒の低タンパク化）や収量の高位安定（たとえば、小麦で600kg/10a）という効果を発揮できる可能性が考えられる。しかし、地下灌漑を実施することで、どのように土壌水分や土壌養分が変動するのかが究明さ

れていない。

そこで、国営農地再編整備事業により、大区画化と地下灌漑施設の導入が進んでいる泥炭地水田地帯で、実態調査（土壌調査と土壌水分の観測、土壌試料の分析）を行い、室内実験で補足することにより、作物の収量と品質を安定して向上させる地下灌漑による土壌養分の制御技術の確立を目指している。

2. 窒素の土壌中での形態変化と作物による吸収

本研究は地下灌漑を利用した場合の、土壌養分の動向を究明することが主題であるが、土壌養分の中でも、特に窒素が作物の品質や収量と密接に関係することから、窒素の動態を把握することが重要である。加えて、泥炭水田輪作圃場では、泥炭に由来する窒素の供給が多く、低タンパク米の生産が難しいことから、地下灌漑により土壌中の窒素を洗脱することができれば低タンパク米の安定生産を実現することが期待できる。

土壌中での有機態窒素は微生物の分解を受けて無機態窒素へ変化していく。畑作のような好氣的条件では、以下のような経路で変化し、最終産物は硝酸態窒素である。

有機物→タンパク質→アミノ酸→アンモニア態窒素→
亜硝酸態窒素→硝酸態窒素

水田のような嫌氣的条件下では、アンモニア態窒素を

硝酸化成する微生物(硝化菌)が絶対好気性菌であるため、アンモニア態窒素からの硝酸態窒素の生成が進行しにくいと考えられる。

また、無機態窒素は、その形態に係わらずガス化して大気中に放出される経路も存在する。このガス化する変化を脱窒と呼ぶ。

土粒子の表面は負に荷電している。そのため、アンモニウムイオンのような陽イオンは吸着保持し、硝酸イオンのような陰イオンは吸着しづらい性質を持っている。

畑作物の多くは硝酸態窒素を吸収利用する。水稻はアンモニア態窒素、硝酸態窒素のどちらでも吸収利用する。

このような窒素化合物の土壤中における形態変化、作物吸収、土壌吸着といった反応を総合的に理解して、水稻の出穂期前後において窒素吸収の制御を行わなければ低タンパク米の安定生産は実現しない。

地下灌漑が有効な手法として定着するためには、土壌中の水分と養分の変化を基礎データとして、農業者が利用できる養水分の制御技術の開発が必要である。

3. 調査方法

3.1 調査圃場

調査圃場は空知総合振興局管内の、石狩川流域に発達していた原野を開拓造成した水田地帯に位置している(図-1)。4箇所の近接した試験圃場(圃場整備工事が実施された整備済水田で、A,B区は各2.3ha、C,D区は各1.5ha)と2箇所の対象圃場(今後の工事を予定している未整備水田で畑作利用のF区0.36haと水田利用のE区0.4ha)で構成している。2011年度の調査は試験圃場とF区で、2012年度の調査は試験圃場とE区で実施した。F区は圃場整備の施工が決定したため、2013年度から調査対象外とした。

試験圃場を含む工区の施工は、2009年度に実施されている。図-2に示すように30枚の水田を7枚の水田に大区画化しており、地盤高の調整のために従前地地盤を剥ぎ取った切土区域(図-2で黄色網掛けで示した)と切土を利用して従前地の地盤を嵩上げた盛土区域(図-2で緑色網掛けで示した)がある。切盛土や表土剥ぎ戻しといった圃場整備に伴う土の移動の断面模式図を図-3に示した。

大区画化後に、ピリ砂利を疎水材とした暗渠が、地下灌漑施設として10m間隔で長辺方向に埋設されている。調査圃場の2010~2014年の作付け履歴を表-1に示した。水稻が作付けされた試験区では、米の低タンパク化を目的として、水稻の出穂期の前後に(概ね7月下旬から8月下旬)地下水位を上昇下降させて、硝酸態窒素の生成と

洗脱を促進して水稻の窒素吸収の抑制が期待できる手法

(以下、低タンパク化対策という)を実施している。2011年は、A区(7/29~8/12)とC区(8/9~8/24)で、美唄市の篤農家の試行事例を参考として48時間給水し24時間排水する操作を5回繰り返した。排水期間を長くすることの窒素洗脱の効果を確認するために、2012年(7/28~8/16)と2013年(8/5~8/25)は、C区で48時間給水し48時間排水する操作を5回繰り返す、2014年(8/6~8/23)は室内実験の結果を反映させて48時間排水し、24時間給水する操作を6回繰り返すパターンを実施した。

表-2にC区での低タンパク化対策実施期間と給水・排水の繰り返しパターンを示した。



図-1 調査圃場の位置図

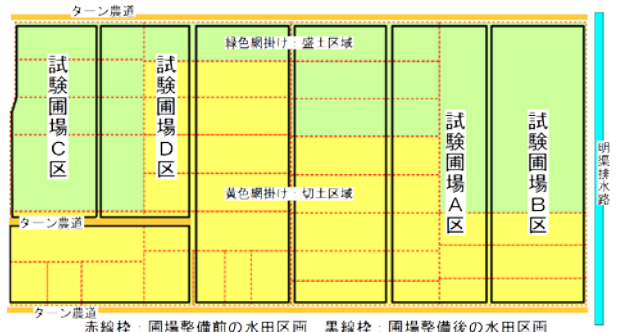


図-2 圃場整備による区画整理・切盛図と試験区の配置

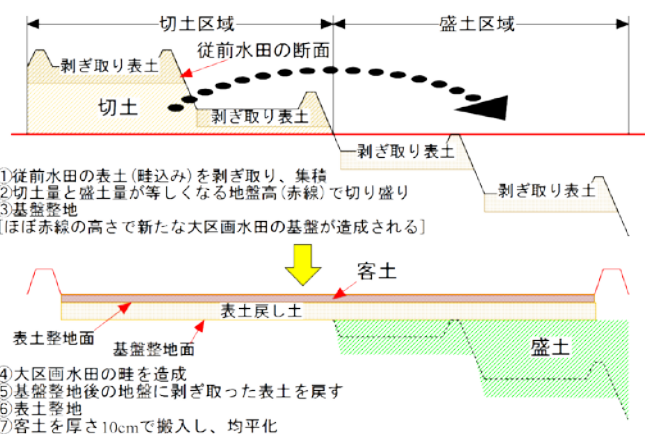


図-3 水田の大区画化に伴う運土の断面模式図

表-1 調査圃場の作付け履歴と2015年作の予定

調査圃場	2010年(H22)	2011年(H23)	2012年(H24)	2013年(H25)	2014年(H26)	2015年(H27)
A区	水稲：移植	水稲：移植	秋播小麦	大豆	初冬播春小麦	秋播小麦
B区	大豆	初冬播種春小麦	秋播小麦	水稲：移植	秋播小麦	秋播小麦
C区	水稲：乾田直播	水稲：無代播 溝直	水稲：移植	水稲：乾田直播	水稲：乾田直播	水稲：無代播移植
D区	水稲：乾田直播	水稲：無代播 溝直	水稲：移植	水稲：乾田直播	水稲：乾田直播	水稲：無代播移植
E区	水稲：移植	水稲：移植	水稲：移植	水稲：移植	水稲：移植	水稲：移植
F区	大豆	初冬播春小麦	秋播小麦			

黄色枠＝地下水位の昇降（低タンパク化対策）を実施
灰色枠＝転作作付
乾直＝乾田直播、溝直＝溝水直播、移植＝苗移植

表-2 C区の低タンパク化対策実施期間と給排水パターン

月日	2011(H23)年	2012(H24)年	2013(H25)年	2014(H26)年
	溝直	移植	乾直	乾直
	2給1排×5	2給2排×5	2給2排×5	1給2排×6
7月28日		給1		
7月29日		給1		
7月30日		排1		
7月31日		排1		
8月1日		給2		
8月2日		給2		
8月3日		排2		
8月4日		排2		
8月5日		給3	排1	
8月6日		給3	排1	排1
8月7日		排3	給1	排1
8月8日		排3	給1	給1
8月9日	給1	給4	排2	排2
8月10日	給1	給4	排2	排2
8月11日	排1	排4	給2	給2
8月12日	給2	排4	給2	排3
8月13日	給2	給5	排3	排3
8月14日	排2	給5	排3	給3
8月15日	給3	排5	給3	排4
8月16日	給3	排5	給3	排4
8月17日	排3	落水	排4	給4
8月18日	給4		排4	排5
8月19日	給4		給4	排5
8月20日	排4		給4	給5
8月21日	給5		排5	排6
8月22日	給5		排5	排6
8月23日	排5		給5	給6
8月24日	落水		給5	落水
8月25日			落水	

3.2 調査項目と調査手法

調査圃場の土壌の性状と地下灌漑に伴う土壌養分の変化を把握するために、以下の5項目の調査を実施した。

- 1) 土壌調査(土壌断面調査と試穿調査)と土壌分析
- 2) テンシオメータによる土壌水分張力の観測
- 3) Ehメータによる土壌の酸化還元電位の観測
- 4) 土中水採取器による土壌間隙水の採取と分析
- 5) 稲と米粒の窒素分析

なお、湛水深と地下水位は同じ圃場で水田水利に関する研究を実施している水利基盤チームの観測データを使用した。

3.2.1 土壌調査と土壌分析

2011年度は調査1年目であったことから、試験圃場とF区の土壌の概要を把握するために土壌断面調査と試穿

調査および低タンパク化対策前後で任意地点での土壌試料採取を実施した。土壌調査の時期は、A, C, D区は水稲作付け前の5月10日から16日にかけて、B区は8月6日、F区は8月24日の小麦収穫後である。2011年度の調査箇所的位置を図-4に示した。

2012年度は、新規に調査圃場に加わったE区で土壌断面調査と試穿調査を実施するとともに、土壌養分の経時変化を把握するために土壌試料を定点で適宜採取した。2012年度以降の調査箇所的位置を図-5に示した。

- ①土壌断面調査：試験圃場では、盛土区域において、埋設されている暗渠のすぐ脇(以下、暗渠脇という)と暗渠と暗渠の中間点(以下、渠間という)の2箇所を、対照圃場では任意の箇所を、深さ1mの試坑を掘り土層構成等の調査と土壌試料の採取を行った(写真-1)。
- ②試穿調査：試験圃場、対照圃場共に、任意の10箇所を30cm四方、深さ40cm程度の小さな穴を掘り(写真-2)泥炭土層の上部に載っている鈹質土の土層構成の確認と層厚の計測、土層毎の土壌試料の採取を行った。
- ③定点土壌試料採取：暗渠埋設ラインの脇と暗渠と暗渠の中間地点で、深さ0~15cmの表層土と15~30cmの下層土を採取した。
- ④土壌分析：土壌断面調査と試穿調査で土層毎に採取した土壌試料の一般理化学性を分析した。
主要な土壌分析項目は以下のとおりである。
 - 全炭素：CNコーダーを用いた燃焼法による分析で、炭素の含有量を知ることができる。
 - 全窒素：CNコーダーを用いた燃焼法による分析で、窒素の含有量を知ることができる。有機態窒素と無機態窒素の合量である。
 - アンモニア態窒素：10%KCl水溶液による土壌抽出液に含まれるアンモニア態の無機態窒素を水蒸気蒸留法で定量する分析で、土壌中のアンモニア態窒素の含有量を知ることができる。
 - 硝酸態窒素：アンモニア態窒素と同様に抽出した土壌抽出液にデバルタ合金を添加して硝酸態窒素をアンモニア態に還元化し、水蒸気蒸留法で定量する。上述したアンモニア態窒素の含有量との差を硝酸態窒素の含有量とした。

12.3 地下灌漑を伴う泥炭水田輪作圃場における
土壌養分制御技術に関する研究

表-3 土壌水分張力の観測期間

試験区	2011年	
A区	水稲(移植)→秋播小麦	7/28~9/16
B区	春小麦→秋播小麦	5/16~8/2、10/15~11/7
C区	水稲(無代かき湛直)	7/29~10/5
D区	水稲(無代かき湛直)	7/29~10/5
試験区	2012年	
A区	秋播小麦	5/8~7/22
B区	秋播小麦	5/8~7/23
C区	水稲(移植)	6/7~9/14
D区	水稲(移植)	6/7~9/14
試験区	2013年	
A区	大豆→春小麦	観測なし
B区	水稲(移植)→秋播小麦	6/17~9/18
C区	水稲(乾直)	6/17~9/27
D区	水稲(乾直)	6/17~9/27
試験区	2014年	
A区	春小麦→秋播小麦	観測なし
B区	秋播小麦→秋播小麦	5/20~7/18
C区	水稲(乾直)	6/19~10/7
D区	水稲(乾直)	6/19~10/7

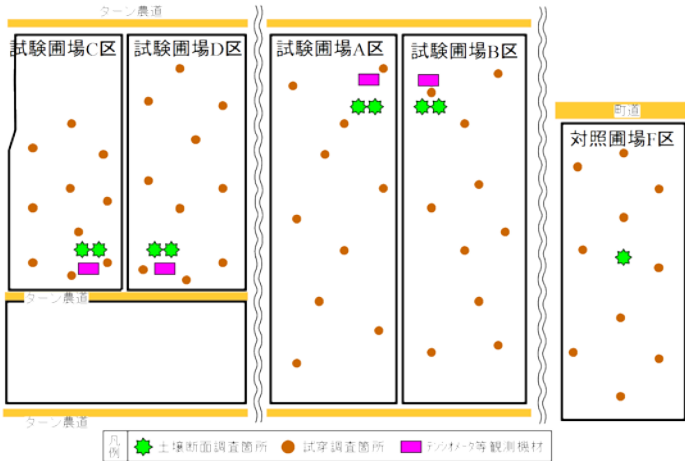


図-4 2011年度の土壌断面調査と試穿調査の位置

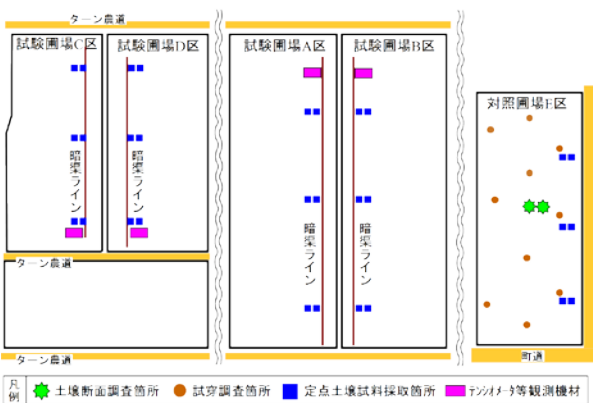


図-5 2012、2013、2014年度の土壌断面調査、試穿調査、
定点土壌試料採取の位置



写真-3 テンシオメータ設置状況



写真-1 土壌断面調査

写真-2 試穿調査

3.2.2 土壌水分張力の観測

土壌水分張力はテンシオメータ法で計測した。暗渠脇と渠間の2カ所に、深度10, 20, 30, 40, 60, 80cmでポーラスカップを埋設し、計測間隔15分で自動記録した。設置状況を写真-3に、4カ年の観測期間を表-3に示した。

3.2.3 土壌の酸化還元電位の観測

土壌が酸化状態にあるのか、還元状態にあるのかは、養分(特に窒素成分)や水分の挙動と強い関連がある。

低タンパク化対策のメカニズムを解明するにあたって、無機態窒素が、酸化物=硝酸態窒素であるのか、還元物=アンモニア態窒素であるのかは、窒素の挙動を考える上で重要な要素となる。そこで、土壌の酸化還元の状態をEhメータで観測記録した。観測位置は、全調査圃場で渠間、センサーの埋設深度は10cmと30cmである。

写真-4に機材の設置状況とセンサーを示した。観測期間は土壌水分張力の観測期間と同じである。



写真-4 Ehメータの設置状況とセンサー

3.2.4 土中水の採取

ポーラスカップ製の土中水採取器具を用いて、地下灌漑による低タンパク化対策前後での土中水を採取し、その窒素成分を分析した。写真-5 に土中水採取器の設置状況を示した。埋設深度は10, 20, 30, 40, 60, 80cmである。2011年度の土中水採取は試行的に7/29と9/13に実施した。2012年度は、C区とD区の水稲作圃場では7/17, 8/6, 8/8, 8/23, 9/14の5回採水した。A区とB区の小麦圃場では7/17のみの採水とした。2013年度は水稲作圃場のB区、C区、D区で7/12, 8/5, 8/13, 8/21に、2014年度は水稲作圃場のC区、D区で6/19, 7/18, 8/4, 8/6, 8/13, 8/22, 9/18に採水した。



写真-5 土中水採取状況

4. 土壌調査結果

4.1 土壌断面調査

試験圃場の代表的な土壌断面として、A区の暗渠脇の土壌断面を示した(写真-6)。表層約10cmは客土で、その直下、深さ約35cmまでが表土戻し土層で、この土層の下部にあたる深さ20~30cmは堅密化した鋤床層となっていた。その下はヨシを主体とした埋木を含む低位泥炭の累積層であった。また、小麦を栽培していたB区の客土は下層土との混和が進み水稲作付け圃場ほど黄褐色の土層が判然とはしていなかったが、試験圃場の基本的な土層構成はいずれの区においても同じであった。これに対して、対照圃場のE区の土層構成は写真-7に示すように、作土層はブラウ耕起の及んだAp2とディスクハローによる碎土のAp1に区分でき、泥炭土層はグライ土層より深い85cm以深に堆積していた。写真-6と写真-7において、泥炭土層以外の土層は鉍質土である。

鉍質土層の厚さや緻密度は作物の根系伸長と関係し、泥炭土層の出現深度、層厚や分解程度は土壌の窒素供給能力の高低と関係する。調査圃場の土層構成から判断されることは、以下の2点である。

- ① 強固な鋤床層が形成された場合は水稲の根系伸長は鉍質土層内に制限されるが、下層の泥炭から供給される無機態窒素による窒素吸収の過剰が生じる可能性がある。
- ② 窒素の過剰吸収は泥炭が厚く堆積している試験圃場で大きく、対照圃場では小さいと考えられる。

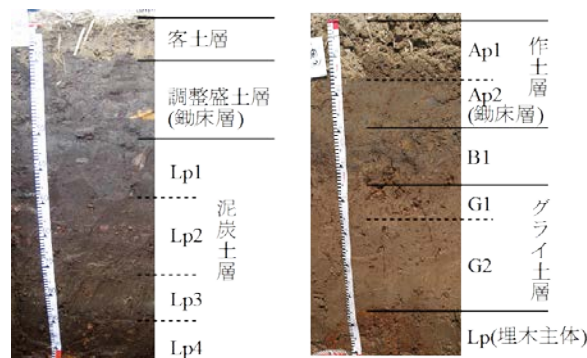


写真-6 A区土壌断面

写真-7 E区土壌断面

4.2 試穿調査

大区画化の施工により、表層土や下層土の層厚、泥炭土が出現する深さにバラツキが生じていると考えられた。このことは、作物の生育ムラや品質ムラの要因ともなることから、試穿調査で確認した。

試穿調査で確認した土層の厚さを表-4に示した。

客土およびAp1(以下、両土層を併せて、表層土という)は耕地の最表層に位置する土層で、A, C, D区では、図-3で客土と図示した部位となる。B区とF区ではディスクハローによる碎土深に相当し、B区では客土と表土戻し土層の上端部の混和層となる。表層土の厚さは、いずれの圃場も平均すると約10cmの厚さであり、A, B, C区では変動係数(標準偏差を平均値で除した百分率)が約30%となるようなバラツキの大きな状況にあった。

調整盛土層およびAp2層(以下、両土層をともに、下層土という)は、表層土の直下で泥炭土が出現するまでの鉍質土層である。その厚さは、図-3の切土区域では表土戻し土と基盤整地面以下で泥炭土が出現するまでの土層の厚さの合計、盛土区域では表土戻し土、盛土と図示した部位の厚さと盛土以下で泥炭土が出現するまでの土層の合計となる。下層土の厚さは対照圃場のF区では15cm程度であるが、試験圃場のA~D区では25~36cmと厚くなっていた。地盤高を調整するために造成された土層であるから、従前地盤の高低や凹凸に対応して層厚にバラツキが生じる。A区で表層土、下層土ともに変動係数が大きな値となっているのは、12枚もの水田を1枚に作り直した圃場で、従前の地盤高の差が大きく、運土量も多かったためと考えられる。

表-4 土層の厚さ (cm)

地点 番号	A区		B区		C区		D区		F区		E区	
	表層土	下層土	表層土	下層土	表層土	下層土	表層土	下層土	表層土	下層土	表層土	下層土
1	10	29	19	33	8	40	8	35	10	15	22	9
2	10	26	11	25	7	36	7	33	7	25	24	10
3	9	29	14	29	3	39	8	29	12	16	23	15
4	8	22	17	21	6	40	5	33	10	15	20	12
5	13	10	16	25	10	40	8	40	10	14	20	10
6	7	35	18	17	12	29	7	37	8	15	20	12
7	16	18	9	24	8	39	8	30	9	15	15	13
8	15	30	15	24	10	35	7	31	13	6	23	24
9	13	29	9	26	8	26	10	29	10	17	17	20
10	10	20	11	23	10	35	8	27	10	14	21	14
平均	11	25	14	25	8	36	8	32	10	15	21	14
変動係数	27%	29%	27%	17%	31%	14%	17%	12%	17%	30%	14%	34%

4.3 土壤分析結果

4.3.1 全炭素含有量と全窒素含有量

試穿調査で採取した土壤試料の全炭素と全窒素の含有率の相関をA,B,C,D区とE,F区に分けて図-6に示した。

A,B,C,D区では、1枚の圃場の中で最小値と最大値の比率は、全炭素で2~4倍、全窒素で2倍程度の開きがあり変動が大きかった。畑作利用のB区ではA,C,D区よりも変動が小さく、やや収束の傾向にあった。

これに対してE,F区では、値のバラツキが極めて小さく、F区ではほぼ1点に集中していた。水平方向においても、垂直方向においても均一化していると言える

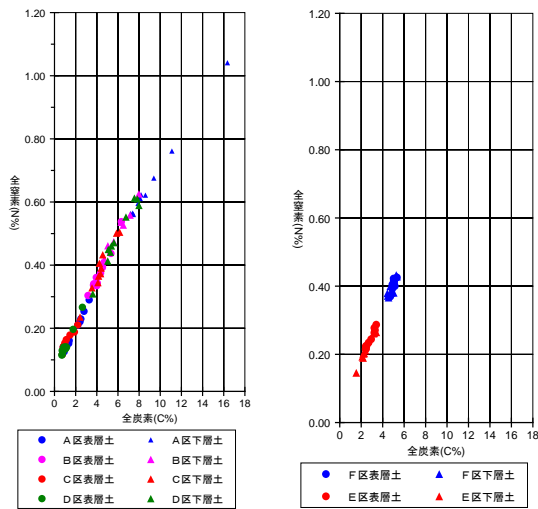


図-6 全炭素と全窒素の相関

4.3.2 土壤の無機態窒素の変化

低タンパク化対策実施前と実施後に表層土と下層土を採取し、アンモニア態窒素と硝酸態窒素の含有量を分析した。水稻は硝酸態窒素であり、アンモニア態窒素であり、どちらの形態の窒素でも吸収利用する²⁾。低タンパク米とは、タンパク含有率が、精米で6.8%以下であるこ

とが出荷基準³⁾となっている。低タンパク米を生産するためには、出穂期~乳熟期の窒素吸収を抑制する手法が水稻作において採用されている。しかし、移植から幼穂形成期までは作物体の生育量を確保するためにも十分な窒素吸収が必要である⁴⁾⁵⁾。つまり、出穂期を境として、土壌中の窒素量を急激に減少させるという制御が求められることとなる。そこで、地下灌漑システムを利用した洗脱が効果的なのではないかと期待されている。

2011年度に低タンパク化対策の前後で採取した表層土のアンモニア態窒素含有量を図-7に、硝酸態窒素含有量を図-8に示した。

アンモニア態窒素は低タンパク化対策の前後で減量しているが、硝酸態窒素は含有量自体が微量であるとともに低タンパク化対策の前後でも変化は認められなかった。しかし、低タンパク化対策を実施したA,C区と実施しなかったD区で同様の傾向が示されており、これらの窒素成分の変動が低タンパク化対策の効果とは判断できないという結果であった。

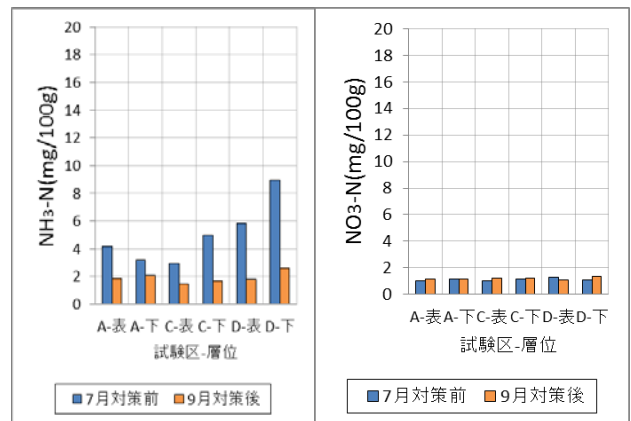


図-7 低タンパク対策前後での土壌中のアンモニア態窒素の変化

図-8 低タンパク対策前後での土壌中の硝酸態窒素の変化

2012~2014年度は、6月初旬から水稻収穫後の10月までの期間に、定点で表層土と下層土の土壤試料を採取した。低タンパク化対策を実施したC区、低タンパク化対策を実施しなかったD区、対照圃場のE区のアンモニア態窒素と硝酸態窒素の経時的変化を2012年度は図-9~12、2013年度は図-13~16、2014年度は図-17~20に示した。

12.3 地下灌漑を伴う泥炭水田輪作圃場における
土壌養分制御技術に関する研究

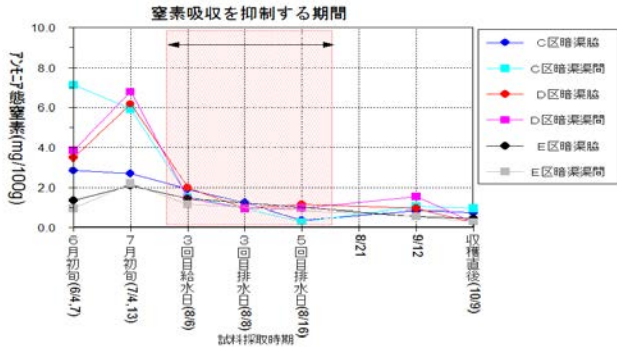


図-9 表層土のアンモニア態窒素の経時変化(2012)

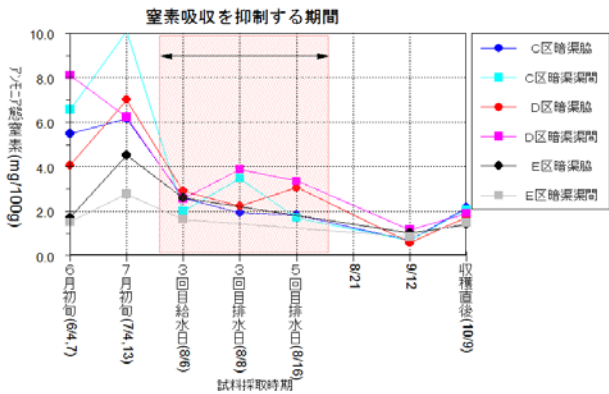


図-10 下層土のアンモニア態窒素の経時変化(2012)

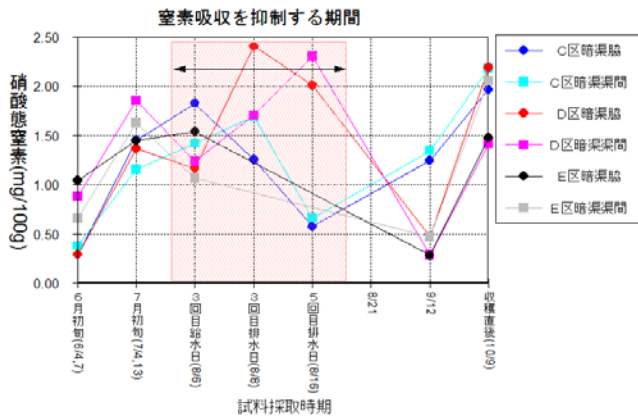


図-11 表層土の硝酸態窒素の経時変化(2012)

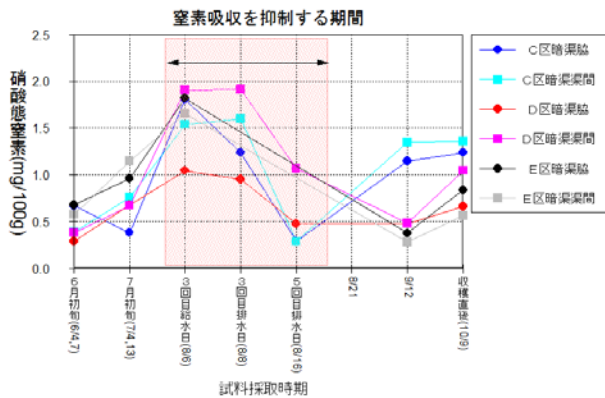


図-12 下層土の硝酸態窒素の経時変化(2012)

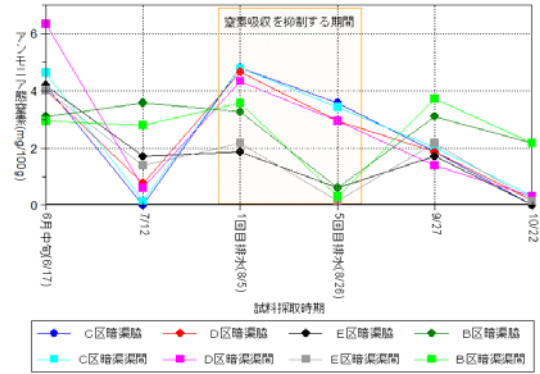


図-13 表層土のアンモニア態窒素の経時変化(2013)

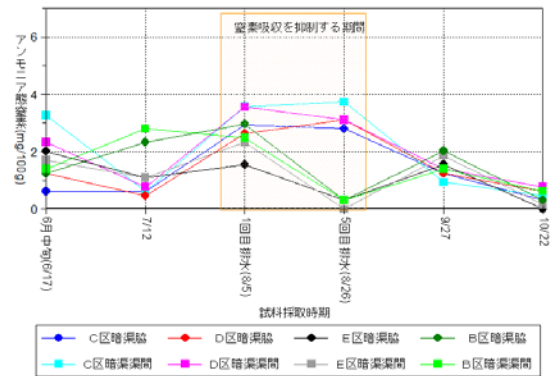


図-14 下層土のアンモニア態窒素の経時変化(2013)

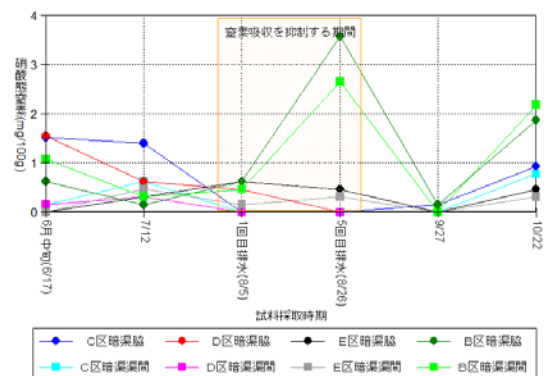


図-15 表層土の硝酸態窒素の経時変化(2013)

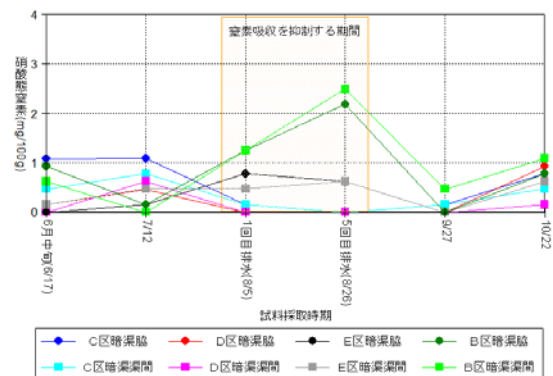


図-16 下層土の硝酸態窒素の経時変化(2013)

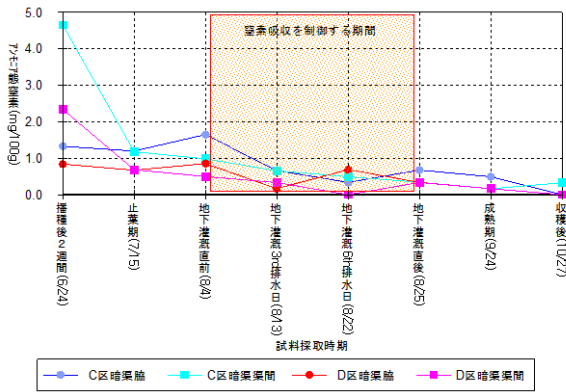


図-17 表層土のアンモニア態窒素の経時変化(2014)

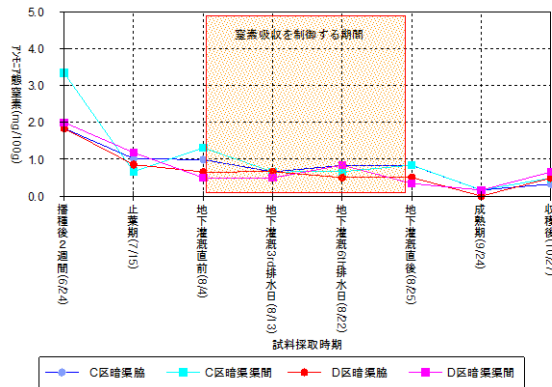


図-18 下層土のアンモニア態窒素の経時変化(2014)

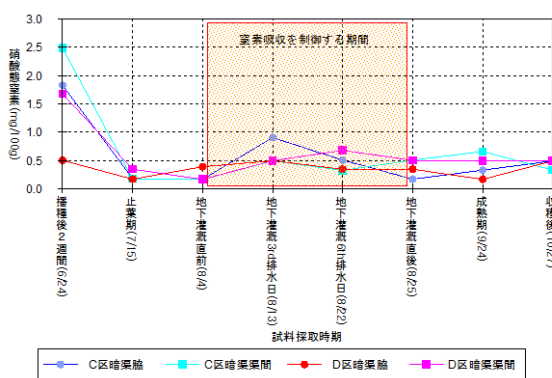


図-19 表層土の硝酸態窒素の経時変化(2014)

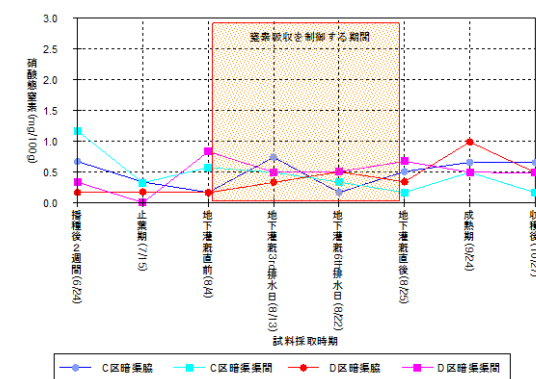


図-20 下層土の硝酸態窒素の経時変化(2014)

対象圃場のE区で収穫される米粒のタンパク含有率は後述するとおり、低タンパク米〜一般米のレベルにある。したがって、試験圃場の土壌中の窒素の経時変化も、対象圃場と同様となることで低タンパク化が達成されると考えられる。

なお、各年度で無機態窒素の動態が異なるのは、栽培方式の違いが反映しているものと考えられる。

①アンモニア態窒素の経時変化

C区の暗渠脇の表層土は対照圃場と同様の推移となっているが、C区の暗渠渠間とD区では、表層土も下層土も7月初旬まで高濃度であることが示されている。8月上旬には対象圃場と同じ濃度レベルに低下しているが、稲の窒素吸収による濃度低下と考えられ、稲の窒素過剰が示唆される。

②硝酸態窒素の経時変化

8月初旬から中旬の低タンパク化対策を実施した期間において、C区の表層土での硝酸態窒素の濃度低下が認められる。このことは、低タンパク化対策により硝酸態窒素の洗脱が可能であることを示している。

4.4 土中水の窒素成分の分析結果

図-21に土中水のアンモニア態窒素の含有量を示した。図中の0.5m、2.5m、5.0mの記載は、暗渠の埋設ラインから離れている距離である。C区の0.5m、採水深度60cm、9月のアンモニア態窒素の含有量が突出して大きいのが、その理由は不明であり、このデータを除けば、総じて、いずれの試験区においても、低タンパク対策前後でのアンモニア態窒素の含有量に大差はない。

一方、硝酸態窒素は、低タンパク化対策前に検出されていたが対策後には全く検出されなくなっていた。これらのことから、低タンパク化対策による地下水の上昇下降で土粒子に捕捉されにくい硝酸態窒素は洗脱され、土粒子に捕捉されやすいアンモニア態窒素は保持されていたと考えられる。

土壌と土中水の無機態窒素濃度の変化から、低タンパク化対策による硝酸態窒素の洗脱は可能と考えられる。しかし、アンモニア態窒素の濃度に比べて、硝酸態窒素の濃度は低いため、洗脱による効果は大きくないと考えられる。

低タンパク化対策の実効性を高めるためには、窒素の硝酸化を強く促進させることが求められる。硝酸化を促進するためには、水中であっても酸化状態を維持することや土壌をある程度乾燥化させることが必要である。このような窒素の形態変化をスムーズに進行させながら地

下灌漑システムの適宜な利用を組み立てていかなければ
ならない。

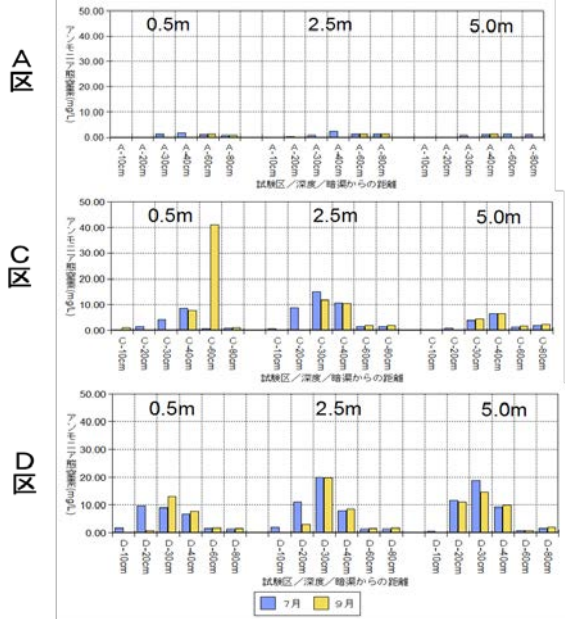


図-21 土中水のアンモニア態窒素の含有量

4.5 土壌水分の動態

4.5.1 土壌水分張力(pF 値)

土壌水分張力は、土壌の含水率を直接に明示する値ではないが、土壌の乾湿状態を表す。土壌水分の状態が、土壌中の窒素の動態と関係が深いことから計測を実施している。図-22 に2012年のC区とD区の観測結果を例示した。

土壌水分張力と土壌の乾湿状態との関係は、大まかに以下のように認識されている。

- ①土壌水分の低下(=乾燥)に伴って、土壌水分張力は大きくなる。
- ②pF0.0とは、土壌中の全ての孔隙が水分で満たされた状態である。
- ③pF0.0を超えてpF1.8程度(=24時間含水量)までは、土壌中の微細な孔隙は水分で満たされているが、粗大な孔隙に部分的に水分が残っている状態である。
- ④pF1.8程度(=24時間含水量)は、土壌中の粗大な孔隙の水分は抜けきっているが、微細な孔隙は水分で満たされている状態である。

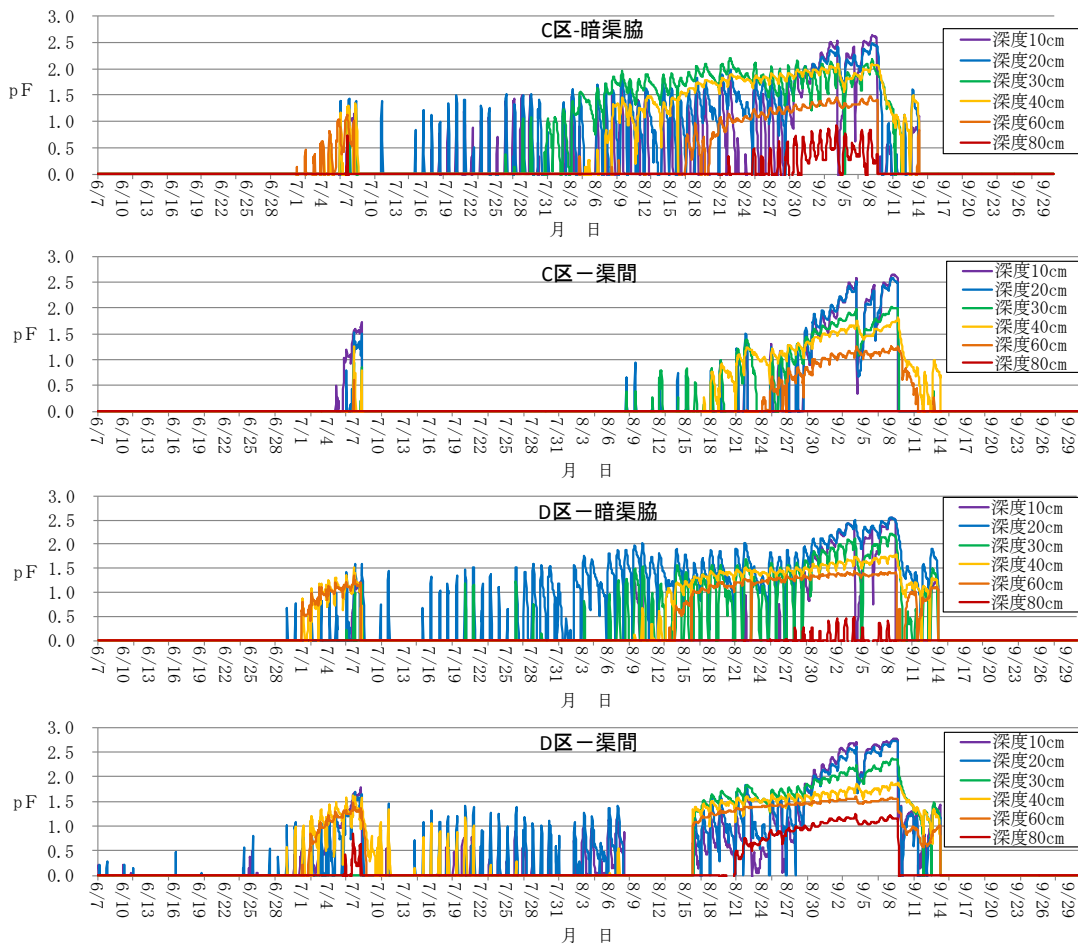


図-22 土壌水分張力(pF 値)の観測結果(2012)

⑤pF1.8程度を越えた値は、土壤中の微細な孔隙の水分も抜け始めている状態である。

水田は、中干し期や収穫前の落水期以外は湛水状態であるため、②の状態であると思われるが、鋤床層の形成で下方への水分移動が抑制されるため、湛水状態であっても土壤水分は③④⑤の状態であることもある。図-23に2013年のC区とE区の耕作期間を通じた地下水位を示した。地下灌漑システムが整備されていないE区は地表面灌漑のみで耕作されている。5月下旬の代播き入水時に地下水位が地表面まで上がるが、湛水が形成された後は地下40~60cmで推移している。土壌が水分飽和になっていけば、そこに地下水位を形成するはずであるから、地表から地下水位に到達するまでの土壌は決して水分飽和ではないことが言える。一方、地下灌漑で給水しているC区では、湛水を形成するためには地下水位も地表面を超える高さに上がっており、土壌の含水率が極めて高い状態が継続していることを示している。

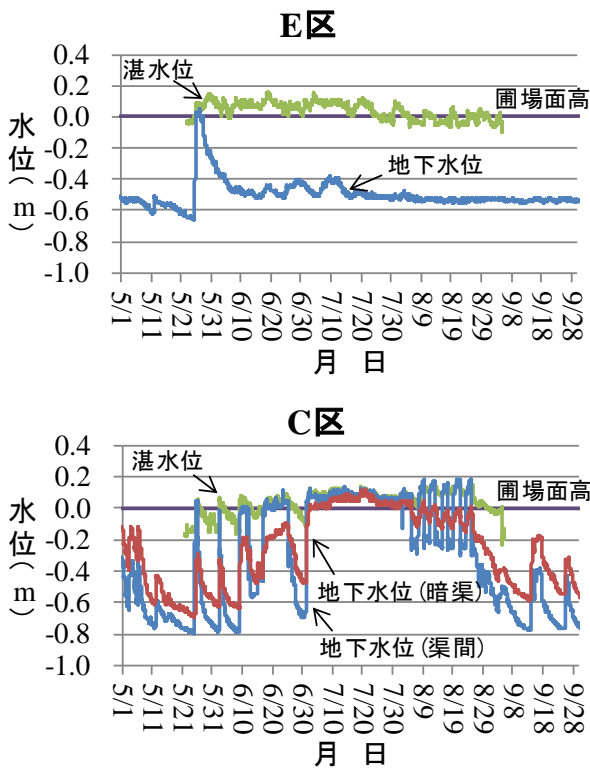


図-23 地下水位と湛水位の動き(2013年)

4.5.2 土壤水分張力観測結果

2012年のC区とD区での観測結果から、低タンパク化対策による地下水制御と土壤水分の関係に着目するために、低タンパク化対策実施期間を含む約25日間の、水稻の根群域である深度20cmと30cmのデータを図-24と図-25に示した。

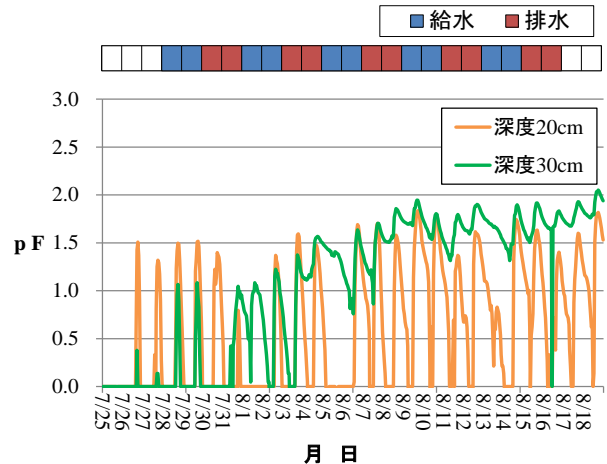


図-24 2012年C区暗渠脇の土壤水分張力

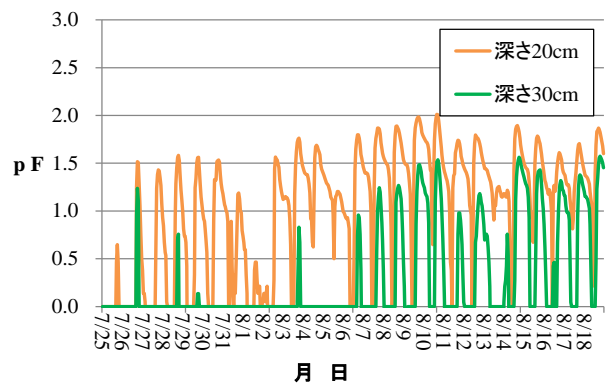


図-25 2012年D区暗渠脇の土壤水分張力

4.5.3 地下水位と土壤含水率

土壤水分張力をpF-水分曲線で土壤含水率に換算し、湛水位および地下水位とともに図-26に示した。2012年C区暗渠脇のデータを代表させて示したが、他の年度や暗渠渠間においても同様の傾向が見られた。

地下水位制御システムを用いて給水と排水を繰り返すことで、地下水位は上昇と下降を繰り返している。しかし、土壤含水率はほとんど変化していない。これは、土壤中の粗大な孔隙の水分の一部は重力で落下しているが、完全に抜けきる状態には到達せず、微細な孔隙の水分は保持されている状態(前述した③の状態)と言える。48時間程度の排水期間では土壤含水率が変化するほどの状態を作り出せていないとも言える。このことは、土壤窒素の硝酸化成を抑制し、地下水制御による窒素制御を難しくさせる要因と考えられる。土壌の含水率を低下させ、硝酸化成を促進させる方法を地下水制御に組み合わせなければならないことが明らかとなった。

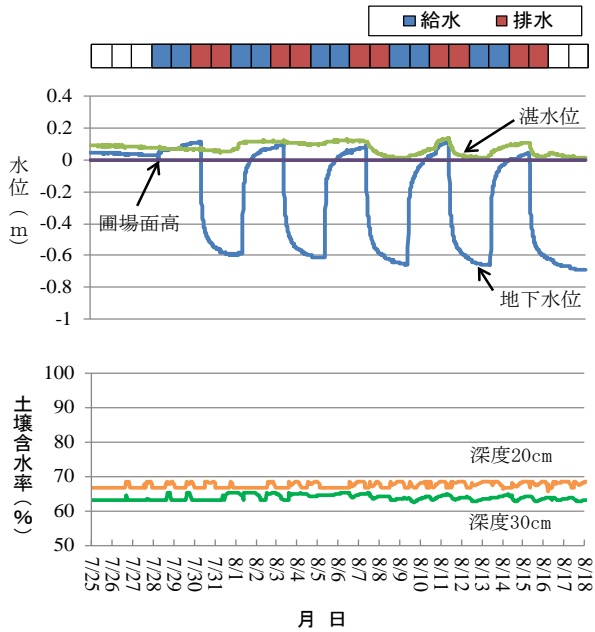


図-26 土壌含水率と地下水位・湛水位の推移(2012)

5. 稲と米粒の窒素成分の分析結果

5.1 稲の生育地点と暗渠埋設ラインとの位置関係による差違

2012 年度までの分析では、暗渠の直上で生育した稲、暗渠の渠間で生育した稲といった厳密な仕分けをしていなかった。一筆の圃場からの収穫物の品質はほぼ同一であることを前提としていたためである。しかし、地下水の上昇下降幅は暗渠の近傍と渠間では異なっていることが明らかとなり、このことが稲の生育にも影響していることが推測された。加えて、暗渠の直上で生育した稲が低タンパク化し、渠間で生育した稲が高タンパク化していることが明らかとなれば、地下灌漑による窒素洗脱と低タンパク化の達成は強く期待できることとなると考えられた。図-27 にこの仮説のイメージ図を示した。

2013 年度と 2014 年度の調査では、稲の生育地点と暗渠埋設ラインを厳密に仕分けた試料採取を行い、分析に供した。稲試料の採取位置は図-5 に示した土壌試料の定点採取地点に暗渠直上を加えた地点である。

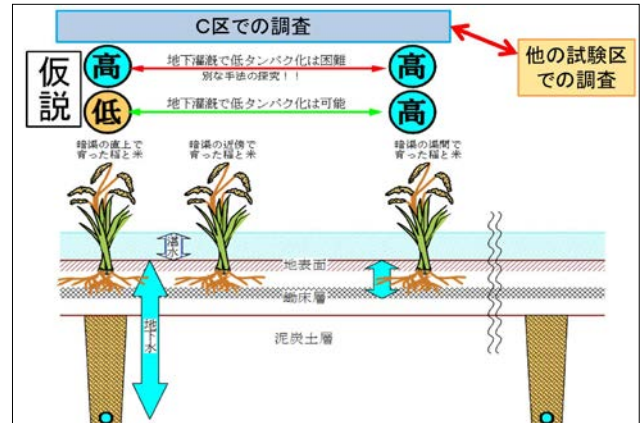


図-27 稲と暗渠の位置関係が低タンパク化に反映するかわきの仮説のイメージ図

このような主旨で採取した 2013 年産の米粒の窒素含有率を表-5 に示した。いずれの圃場においても、暗渠の直上では窒素含有率が少なく、渠間では多くなるという明確な状況は認められなかった。このことは 2014 年産においても同様の結果であった。

表-5 暗渠からの生育位置が異なる米粒の窒素含有率(%)

C 区：乾直・地下水制御				B 区：移植			
	渠上	渠脇	渠間		渠上	渠脇	渠間
北側	10.0	9.3	9.9	北側	12.4	13.1	11.9
中央	10.4	10.5	9.7	中央	12.4	14.0	12.0
南側	10.3	9.9	9.9	南側	12.5	11.9	12.1
平均	10.2	9.9	9.9	平均	12.4	13.0	12.0

D 区：乾直				E 区：移植[非泥炭土]			
	渠上	渠脇	渠間		渠上	渠脇	渠間
北側	10.3	10.7	10.9	西側	8.4	8.5	8.8
中央	11.0	11.3	10.8	中央	9.0	8.5	9.9
南側	11.4	11.1	11.0	東側	8.4	8.8	9.4
平均	10.9	11.1	10.9	平均	8.6	8.6	9.4

5.2 稲の窒素含有率

止葉期と成熟期に稲体を採取して、根部・茎葉部・穂部に分離して窒素成分を分析した。供試体を写真-8 に、茎葉部の分析結果を表-6 に示した。



写真-8 稲の供試体

表-6 稲(茎葉部)の窒素成分の分析結果

試験区	止葉期			成熟期		
	2012年産	2013年産	2014年産	2012年産	2013年産	2014年産
C区	2.61	2.20	1.70	1.52	1.17	1.27
D区	2.79	2.07	1.43	1.74	1.48	1.17
E区	—	1.63	2.53	—	0.97	1.13
B区	—	1.33	—	—	1.50	—

単位：乾物当り重量%

作物栄養診断基準¹⁾では、茎葉部の窒素含有率の基準値が示されており、止葉期で1.8~2.6%、成熟期で0.6~0.8%となっている。この基準値で供試体の分析値を概括的に評価すると、C,D区では、止葉期においては基準値をほぼ満足しているが、成熟期においては約2倍となっており、窒素の過剰吸収が認められる。E区では止葉期は基準値に達していないが成熟期では基準値に近似した値に低下している。B区では成熟期に基準値を大きく上回っていたという傾向にあり、米粒のタンパク含有率と相関している。

このことは、出穂期前後の土壌由来窒素の吸収が米粒タンパク含有率を決定するという従来の知見と合致している。また、試行した低タンパク化対策では、若干の効果はあるが、十分な効果を発現させることができなかったということも示している。

5.3 米粒のタンパク含有率

4年間の試験区別の米粒(玄米)のタンパク含有率を図-28に示した。5.1で述べたような稲の生育地点の暗渠からの距離で米粒のタンパク含有率に大差はなかったことから、圃場全体の平均値で示した。

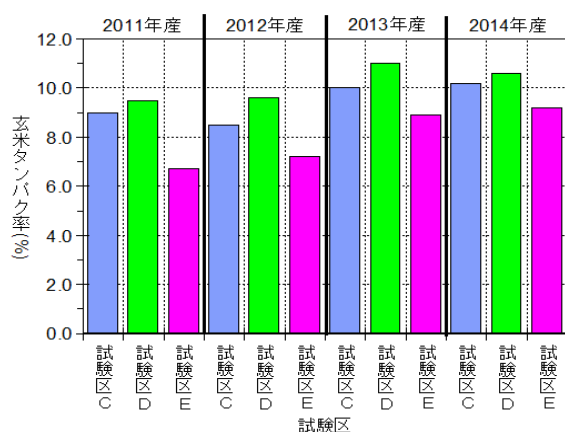


図-28 米粒(玄米)のタンパク含有率

北海道米の精米のタンパク含有率は、6.9%未満で低タンパク米、6.9~7.9%で一般米、7.9%を超えると高タンパク米とされている³⁾。また、精米のタンパク含有率

は玄米のタンパク含有率より0.5~1.0%低下する(精白により糠が脱落するため)。

調査圃場で収穫された米粒のタンパク含有率は、E区では低タンパク米~一般米の品質であるが、試験圃場では4ヵ年とも一般米~高タンパク米の品質であった。しかし、同一の栽培方式を実施しているC区とD区の比較では、低タンパク化対策を継続しているC区で、低タンパク化対策を実施していないD区より常に低い値を示している。このことから、低タンパク化対策の効果が徐々に発揮し始めてきている可能性がある。

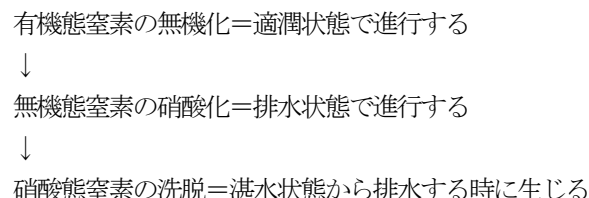
6. 室内実験

6.1 2012年度の室内実験

6.1.1 目的

低タンパク化対策における地下水位の制御パターンは、給水日数と排水日数の期間の組み合わせとなる。また、低タンパク化対策が効果的な時期は、水稻が米粒への窒素蓄積を開始する出穂期の20日間と考えられている。この限られた時期に現地圃場で多様な制御パターンを実験することは困難である。

そこで、土壌中の窒素成分は、どのようなパターンで排水と湛水を行うことで効率良く減少するのかを確認することを目的として実験を設計した。窒素成分の減少は以下のプロセスで進行することを想定している。



6.1.2 装置の概要

室内実験装置は独自に製作した。実験装置の外観を写真-9に示した。

一組の実験装置は、以下の部品で構成している。

- ①水槽：幅150×奥行300×高さ900mm。
底部に給水と排水のためのバルブをセット。
- ②土柱籠：直径50mm×長さ700mmのステンレス製パンチングメタルの有底円筒。
- ③不織布袋：直径50mm×長さ750mm。供試土壌を充填して土柱籠に収めるための不織布を縫製した袋。
この実験装置を7組作製した。



写真-9 室内実験装置の外観

6.1.3 方法

試験圃場から定点で採取して風乾保管してあった表層土と下層土を、それぞれに混和調整し、室内実験供試土とした。充填密度は現地土壌と近似させることとし、60cmの供試土柱の上部30cmには表層土を489g、下部30cmには下層土を553g充填した。

この供試土柱を56本作成し、室内温度を30℃に設定した恒温室に置いた7個の水槽にそれぞれ8本ずつ投入し、バルブから蒸留水を給水して供試土柱を完全に水没させた。

第3区にはEhメータを仕込んだ供試土柱を2本(Ehセンサーの深度が10cmと50cm)追加し、土壌の還元状態をモニタリングした。

供試土中を水没させてから、19日後にEhメータの値が-150mVより低下したことから、排水と給水の操作を開始した。排水期間と給水期間の組み合わせの違いを試験区とし、設定した試験区は7区で、図-29に示した。

図-29で、茶色は排水状態、水色は湛水状態であることを意味している。また、青四角印は供試土柱を1本採取したタイミングを示した。採取した供試土柱は10cm刻みに6分割して風乾し、窒素分析に供した。

処理区	経過日数																	
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	
1区	13排1給1排																	以下、落水
2区	4排1給×3回																	以下、落水
3区	1排1給																	
	2排1給																	
	3排1給																	
	4排1給																	以下、落水
4区	2排1給×5回																	以下、落水
5区	2排2給×4回																	以下、落水
6区	1排2給×5回																	以下、落水
7区	0排16給																	以下、落水

図-28 室内実験での試験区設定

6.1.4 実験結果

6分割した深さ別の試料ごとの全窒素含有率を図-30～図-35に示した。

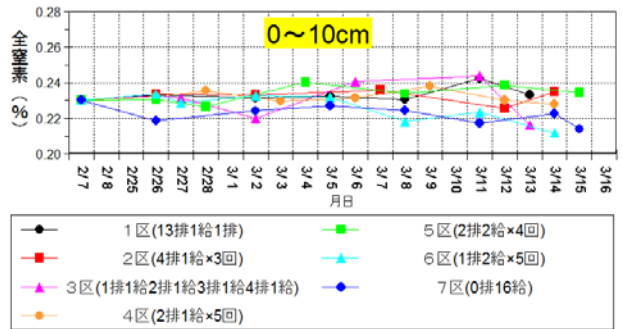


図-30 深さ0～10cmの土層の全窒素の経時変化

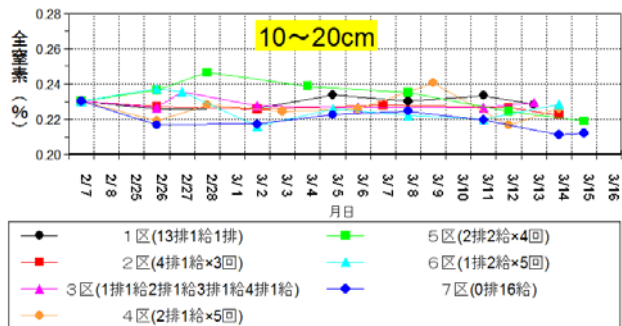


図-31 深さ10～20cmの土層の全窒素の経時変化

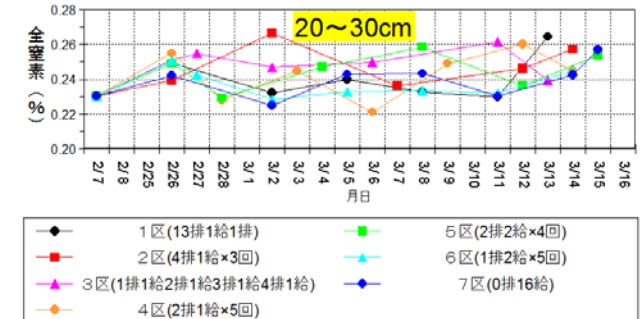


図-32 深さ20～30cmの土層の全窒素の経時変化

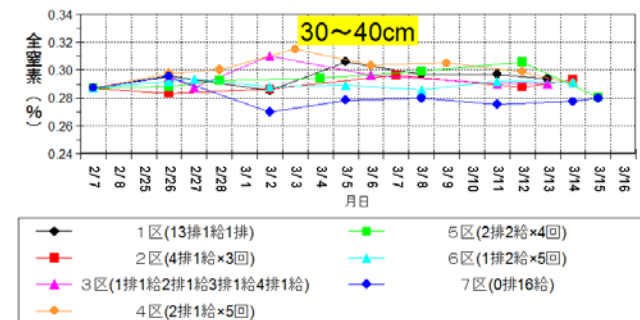


図-33 深さ30～40cmの土層の全窒素の経時変化

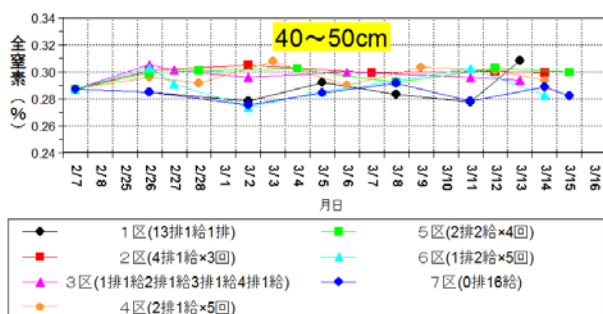


図-34 深さ40~50cmの土層の全窒素の経時変化

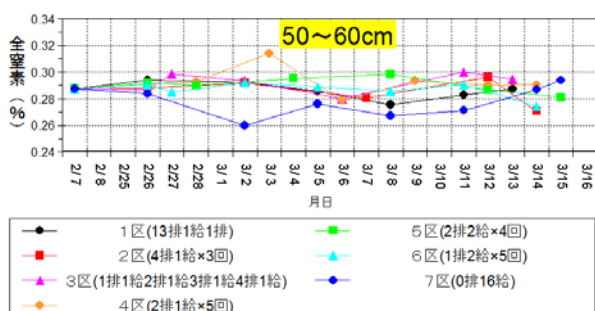


図-35 深さ50~60cmの土層の全窒素の経時変化

有機態窒素であれ、無機態窒素であれ、洗脱されれば全窒素の量は減少することとなる。今回の実験では、そのような明らかな結果は得られなかったが、以下の知見を得ることができた。

①20~30cmの土層は、その直下で土壌の充填密度が大きくなり、重力水や毛管水の移動速度の変曲点になっていると考えられる。この土層では、全ての試験区で実験終了時には実験開始時の窒素含有率より高い値となった。このことから、現地圃場では鋤床層の直上に窒素の濃度上昇が生じている可能性があり、調査を行う必要がある。

②7種類の処理区の中で、最も強い乾燥状態とした第1区においても期待したような窒素濃度の低下が生じなかった。硝酸化成菌等の微生物の活性維持を配慮した水分の維持が必要と考えられる。

6.2 2014年度の室内実験

6.2.1 目的

地下からの給排水が、土壌からの窒素流出量および土壌中の窒素成分の形態変化に与える影響を調べるため、室内でカラム試験をおこなった。

6.2.2 方法

室内試験のカラムを図-36に示す。内径16.5cm、高さ55cmの透明塩化ビニル管を用いた。2012年、2013年に試験圃場で採取して風乾後2mmのふるいを通して保管していた鉍質土壌と、2014年7月に試験圃場周辺で採取した未風乾の泥炭土壌を供試した。カラムの上部30cmに鉍質土壌を0.93 g/cm³の乾燥密度で、カラムの下部15cmに泥炭土壌を0.20 g/cm³の乾燥密度で充填した。

カラムは9本作成し、培養は25℃でおこなった。カラムの最下部から蒸留水を入水し、12日目まで湛水培養し排水した。さらに、26日目まで排水口を開放した状態で培養した後、再度入水し30日目まで湛水培養をおこなった。

カラムには、土中水採取器を7.5cm、22.5cm、37.5cmに埋設した。また、13、26、31日目にそれぞれ3本のカラムの土壌を0-15、15-30、30-45cmで採取した。

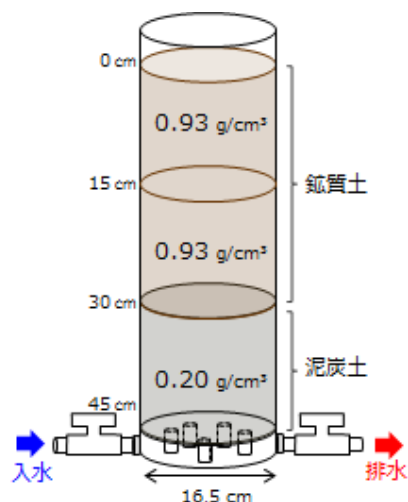


図-36 室内試験のカラムの模式図

6.2.3 結果

湛水および排水、土中水中のアンモニウム態窒素濃度と硝酸態窒素濃度を図-37に示す。アンモニウム態窒素濃度は、泥炭土壌よりも鉍質土壌で高く、入水後12日目までの湛水期間で上昇した。一方、硝酸態窒素濃度は、入水後0~1 mgN/Lと非常に低い濃度で推移し、排水期間に7.5cm深で上昇した。7.5cm深では再入水後、30 mgN/Lまで上昇したが、その後3日間の湛水状態で1 mgN/L未満まで低下した。これは、脱窒によるものと考えられ、0~15cmの土壌では、再入水前の土壌中硝酸態窒素を消費するだけの脱窒能が認められた(図-38)。脱窒能は、アセチレン阻害法(KNO₃ 50mgN/Lを添加し、3時間嫌気培養した時のN₂O生成速度)で測定した。

排水中のアンモニウム態窒素濃度と硝酸態窒素濃度は、いずれも0.3 mgN/Lを下回ったが、再入水後の湛水には、20 mgN/Lを超えるアンモニウム態および硝酸態窒素が含まれていた(図-37)。

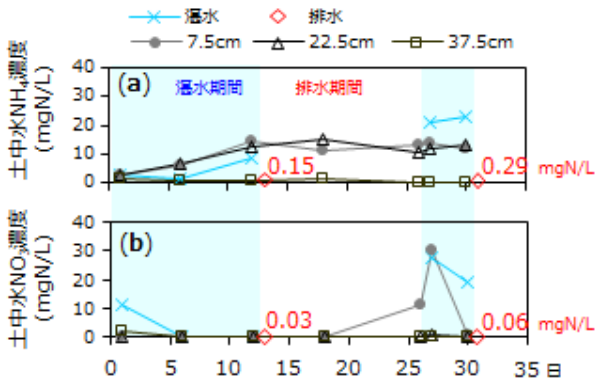


図-37 湛水および排水、土中水の中のアンモニウム態窒素濃度 (a) と硝酸態窒素濃度 (b)

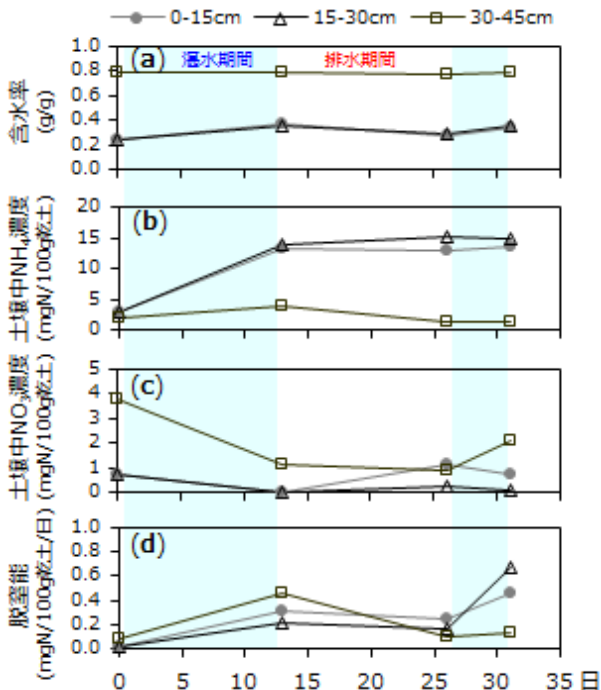


図-38 土壌の含水率 (a) および土壌中アンモニウム態窒素濃度 (b)、硝酸態窒素濃度 (c)、脱窒能 (d)

7. まとめと今後の課題

4 年間の現地調査から以下の事項が明らかとなった。

- ① 土壌中の硝酸態窒素は、低タンパク化対策により洗脱されていると評価できる結果が得られた。
しかし、その量は小さく、低タンパク化対策を実施した時点で硝酸態として存在していた窒素の洗脱に留ま

っていて、有機体窒素やアンモニウム態窒素を硝酸化成して洗脱されているものではないことが示唆された。

- ② 土壌中のアンモニア態窒素は、低タンパク化対策の適期である出穂期において、表層土は適正な濃度にあるが、下層土において高い状態にあった。室内実験においても、土層の緻密度が大きくなる土層の直上に窒素の集積が認められた。

- ③ 土壌の含水率 (pF 換算値) と地下水位の動態を解析した結果、地下水位の低下と含水率の低下のタイムラグは7日間以上と想定以上に長いことが明らかとなった。このことは、48時間程度で地下水位を昇降させても土壌含水率の変化は生じにくく、硝酸化成を抑制している要因の一つと考えられた。

- ④ 2014年度の室内実験では土層下部からの排水(=暗渠排水)に比べ、土層上部の湛水に含まれる無機態窒素の量が多いことが確認された。

- ⑤ 米粒のタンパク含有率の試験区比較では、低タンパク化対策の実施によりタンパク含有率が低下する傾向が認められたが、米麦出荷基準に照らすと高タンパク米のレベルにあった。また、稲の茎葉部の窒素含有率は作物栄養診断基準の値を大きく上回っており、窒素の過剰吸収が認められた。

- ⑥ 稲の茎葉と米粒の分析に供試した株は、低タンパク化対策による地下水の上昇下降に大きな差がある暗渠直上、暗渠近傍、暗渠間を明確に仕分けた供試体を採用し分析を行った。その結果、水稻の生育地点と暗渠との位置関係は稲体や米粒の窒素成分に影響していないことが明らかとなった。

これらの結果から、以下の事項が今後の課題と考えられた。

- ① 土壌の水分を早期に低下させ、硝酸化成を促進させる手法の究明
- ② 地下水を利用した洗脱のみならず脱窒と複合させた窒素制御技術の究明
- ③ 上記の技術開発を、水稻の収量や品質を確保しつつ、環境にも配慮して実施する技術の開発

参考文献

- 1) 北海道農政部：北海道施肥ガイド 2010(施肥標準・診断基準・施肥対応)、平成 22 年 3 月
- 2) 山根一郎：水田土壌学、社団法人農山漁村文化協会、昭和 57 年 8 月
- 3) 社団法人北海道米麦改良協会：平成 24 年度産に向けての北海道の米づくり、平成 24 年 2 月
- 4) 稲津脩：多様な水稲栽培方式における水田土壌肥料の現状と方向 6. 食味と土壌 施肥管理、日本土壌肥科学雑誌 第 69 巻第 1 号 p. 88~92、1998 年
- 5) 後藤英次ほか：寒地水稲における施肥法別の窒素利用率と各器官への分配率が白米タンパク質含有量に及ぼす影響、日本作物学会紀事 第 75 巻第 4 号 p. 451~458、2006 年
- 6) 社団法人農業土木学会：土地改良事業計画設計基準 計画「ほ場整備(水田)」基準書 技術書、農林水産省構造改善局計画部資源課監修、平成 12 年 1 月

12.4 A Study on Soil Nutrient Control Technology in Peaty Paddy-Upland Rotation Field Areas with Subsurface Irrigation

Budget : Grants for operating expenses

General account

Research Period : FY2011-2015

Research Team : Rural Resources Conservation Research Team

Author : YOKOHAMA Mitsuhiro

ISHIDA Tetsuya

NIITSU Yuki

KUWABARA Jyun

SHIMIZU Mariko

Abstract : To examine the characteristics of soil nutrients in situations where subsurface irrigation is used, a study was performed on four large blocks of paddy-upland rotation field with thick bottom-layer peat accumulation in which such irrigation was applied. The investigation involved a soil profile survey, physicochemical soil property analysis, soil moisture potential observation, and componential analysis of water in the soil before and after water management for the reduction of rice protein content. The results revealed that fluctuations in the ground water level resulting from the protein content reduction work using a subsurface irrigation system (based on five cycles with two days of water supply and one day of drainage each) did not spread sufficiently into spaces between underdrains, causing high water retention in soil, insufficient progress of nitrification and leaching of inorganic nitrogen. Against this background, there is a need to develop a subsurface irrigation method that can improve the effectiveness of work to reduce rice protein content.

Key words : subsurface irrigation, peaty paddy-upland rotation, low-protein rice