

地下水位制御による土壌中の無機態窒素および水分動態への影響

木村秀也^{*1}・前川富也^{*2}・新良力也^{*1}・浜口秀生^{*2†}・島田信二^{*2‡}

目 次

I はじめに	1	V 謝 辞	8
II 材料と方法	2	VI 引用文献	8
III 結果と考察	2	Summary	10
IV 摘 要	8		

I はじめに

2014年度のダイズ作付面積は全国で131,600haであり、そのうちの84%に当たる110,800haは水田で栽培されている⁽¹⁰⁾。同年度のダイズの平均収量は、畑作ダイズが約50%を占める北海道では256kg/10aであるのに対し、水田転換畑での作付けが93%に達する都府県平均では148kg/10aと低く⁽¹⁰⁾、排水性の悪い水田での作付けが収量低下の一因となっていると考えられる。

畑作物の生育は土壌の水分環境による影響を大きく受ける。ダイズでは、播種後の湿害により病原微生物が活性化されて、発芽率が大きく低下することで減収につながる⁽⁵⁾。また、干ばつは葉面積に見合った水分供給を妨げるために、光合成速度が低下し、根粒の窒素固定量や生育量が減少する。その結果ダイズが減収する可能性が指摘されている⁽¹¹⁾。

近年、暗渠排水機能と地下灌漑機能を併せ持つ地下水位制御システム（Farm-Oriented Enhancing Aquatic System, FOEAS）が開発された⁽¹³⁾。排水機能しか持たなかった暗渠に代わり、2014年3月には全国で9,304haにFOEASが導入（施工予定を

含む）されている⁽¹⁴⁾。排水性を向上させ、さらに地下水位制御機能により、干ばつ時の地下からの灌漑を可能にするFOEASの導入は、水田輪作体系における農作物の収量および品質の向上に大きく寄与すると考えられる。これまでにFOEASを活用したイネ、ムギ、ダイズ、野菜の栽培技術に関する試験研究が数多く実施され、FOEASの導入条件、維持管理法を含めたマニュアルが作成されている⁽⁹⁾。また、水田輪作体系では畑作物の導入に伴い、土壌有機物が減少し、可給態窒素が低下することが指摘されている⁽⁶⁾。特にダイズは他の畑作物に比較して土壌有機物の分解を促進させる可能性が指摘されており、地力維持のためには有機物施用が必要とされている⁽⁷⁾。

FOEASにより夏期の畑状態で地下から灌漑する場合、ダイズの生育に伴う蒸発散量の増加による下層からの水の移動が盛んになり、硝酸態窒素などの水とともに移動する養分の動態や、硝酸化成などの水分条件に大きく依存する土壌微生物活性に影響を及ぼすことが予想される。そこで本報で

平成27年05月20日受付 平成29年10月10日受理

^{*1}農研機構中央農業研究センター土壌肥料研究領域 ^{*2}農研機構中央農業研究センター生産体系研究領域

[†]現在、農研機構本部 [‡]現在、農研機構中央農業研究センター企画部

は、FOEAS導入による圃場でのダイズ栽培期間中の土壤水分特性と無機態窒素濃度におよぼす影響について検討するため、2009年は耕起・不耕起区を、

2010年は有機物施用・無施用区を設けた試験を行い、それぞれ事例を得たので報告する。

II 材料と方法

1. 試験圃場と耕種概要

茨城県つくば市古来にある土壤タイプが黒泥土^(3,8)のFOEASを施工した現地調査圃場において、2009年、2010年にダイズ栽培試験を行った。両年とも前作はコムギで、供試品種は茨城県の奨励品種であるタチナガハを用いた。

2009年はFOEASを施工し、7月14日のダイズ播種から8月31日まで地下水位を30cmに設定した圃場（FOEAS圃場）と、暗渠などの地下排水設備を持たないが、圃場面に微傾斜（1/1000勾配）をつけ、表面からの排水性を向上させた圃場（対照圃場）を供試した。処理区としてFOEAS圃場では耕起深を12cmとした耕起播種区（以下同様）および不耕起播種区、対照圃場では耕起播種区のみを設定した。各処理区とも基肥として播種前に窒素：リン酸：カリウムを10aあたり2.5:10:10（kg）化成肥料で土壤表面に施用した。播種日は7月14日で、11月4日に収穫期の坪刈り調査（不耕起播種区は3.8m²、耕起播種区は4.4m²）を3反復で行った。

2010年は前年と異なるFOEAS施工圃場において、2009年と同様の地下水位調整を行うFOEAS圃場と、2009年とは異なる、地下排水設備を持たず、微傾斜による排水性向上対策を行っていない対照圃場を供試した。基肥は前年と同様とし、耕起播種を行った。また、堆肥施用によるダイズへの影響を調査するため、ダイズ播種前の6月28日に2t/10aの牛ふん堆肥を施用する処理区を両圃場に3反復（1区面積は20m²）で設定した。播種は7月5日で、

11月16日に収穫期の坪刈り調査（8.4m²）を行った。栽培期間中の降水量はつくば市のアメダスの観測値を用いた。

2. 土壤調査

大豆栽培開始から2週間おきに各処理区より2009年は深度0～10cm（以下10cmと記す）、10～20cm（以下20cm）の土壤コアを採土器（大起理化学工業株式会社（以下D社）DIK-1601）により採取した。2010年は10cm、20cmに加えて、深度20～30cm（以下30cmと記す）の土壤コアを採取した。各処理区から2サンプルずつ採取し、そのうち一方のコアから2mmで篩別した生土を調製し、10%塩化カリウム溶液で無機態窒素を抽出した。抽出液のアンモニア態窒素はインドフェノールブルー法、硝酸態窒素はカドミウム還元カラムとグリーンスイロスベイ変法を採用したフローインジェクション装置（アクア・ラボ社FL200）により定量した。残りの土壤コアを105℃炉乾法で乾燥させて体積含水率（%）を算出し土壤水分含量とした。

ダイズ播種前と収穫後に深さ15cmまでの土壤を作土として採取し化学性分析を行った。2010年5月31日（耕起前）、9月1日、11月24日（収穫後）の深度10cm、20cm、30cmから採取した土壤コアサンプルについて、砂柱法キット（D社製DIK-3521）および多容量土壤pF測定器（同社製DIK-3423）を用いてpF-水分曲線を作成した。

III 結果と考察

1. 供試圃場作土の土壤理化学性と水分特性

供試圃場作土の土壤理化学性を表1に示した。各年度で供試したFOEAS圃場と対照圃場間では、2009年の播種前土壤でのアンモニア態窒素（表1-1）と、2010年の播種前土壤でのpH（表1-2）に有意な差異があった。年度間の比較では、2010年

供試圃場で有効態リン酸含量が低かった。しかし、播種期には茨城県の水田土壤改善基準である乾土100gあたり10mg～30mg⁽⁴⁾は満たしており、ダイズの生育に影響を及ぼすような地力の差はなかった。

2009年の降水量と土壤水分含量を図1に示した。FOEAS圃場では土壤水分含量は比較的安定し、降

表1-1 2009年供試圃場の土壌理化学性

2009年	圃場	播種様式	pH		有効態リン酸 (mg/100g)	交換性カリ (mg/100g)	交換性苦土 (mg/100g)	交換性石灰 (mg/100g)	ホウ素 (mg/kg)	熱水抽出N (mg/100g)	全窒素 (%)	硝酸 (mgN/100g)	アンモニア (mgN/100g)
			(H ₂ O)	(H ₂ O)									
播種前 (7月9日)	FOEAS		5.99 ^{ab}	62.1	89.7 ^a	698.2 ^a	0.76 ^a	5.24	0.24 ^d	0.69 ^a	0.70 ^a		
	対照		5.82 ^b	71.2	94.1 ^a	679.1 ^a	0.75 ^{ab}	4.97	0.25 ^{cd}	0.54 ^a	0.48 ^b		
収穫後 (11月4日)	FOEAS	耕起栽培	5.86 ^b	73.1	92.6 ^a	579.2 ^b	0.85 ^b	5.65	0.27 ^b	1.76 ^b	0.43 ^b		
	FOEAS	不耕起栽培	6.23 ^a	74.8	114.1 ^b	689.7 ^a	0.85 ^{ab}	5.72	0.27 ^{abc}	1.48 ^b	0.35 ^b		
	対照	耕起栽培	6.03 ^{ab}	70.2	107.8 ^b	659.7 ^a	0.82 ^{ab}	5.41	0.29 ^a	1.57 ^b	0.40 ^b		

*異なる文字間にはTukey多重比較(p < 0.05)で有意差あり

表1-2 2010年供試圃場の土壌理化学性

2010年	圃場	堆肥施用 (t/10a)	pH		有効態リン酸 (mg/100g)	交換性カリ (mg/100g)	交換性苦土 (mg/100g)	交換性石灰 (mg/100g)	ホウ素 (mg/kg)	熱水抽出N (mg/100g)	全窒素 (%)	硝酸 (mgN/100g)	アンモニア (mgN/100g)
			(H ₂ O)	(H ₂ O)									
播種前 (6月28日)	FOEAS	-	5.80 ^c	30.6 ^{ab}	124.7	863.3 ^a	0.87 ^a	6.61 ^a	0.35 ^a	0.68 ^b	0.80 ^{bc}		
	対照	-	6.05 ^b	41.5 ^a	110.6	822.4 ^a	0.69 ^{ab}	5.90 ^{ab}	0.33 ^a	0.46 ^b	0.49 ^c		
収穫後 (11月5日)	FOEAS	2t	6.60 ^a	34.5 ^{ab}	84.2	311.3 ^b	0.57 ^b	5.11 ^b	0.21 ^b	1.53 ^a	1.07 ^{ab}		
	FOEAS	0t	6.43 ^a	23.8 ^b	68.9	306.9 ^b	0.50 ^b	4.31 ^b	0.19 ^b	1.31 ^a	1.35 ^a		
対照	2t		6.63 ^a	31.8 ^b	89.2	352.0 ^b	0.49 ^b	5.75 ^{ab}	0.22 ^b	1.42 ^a	1.43 ^a		
	0t		6.60 ^a	26.7 ^{ab}	73.2	309.2 ^b	0.48 ^b	5.56 ^b	0.19 ^b	1.26 ^a	1.56 ^{ab}		

*異なる文字間にはTukey多重比較(p < 0.05)で有意差あり

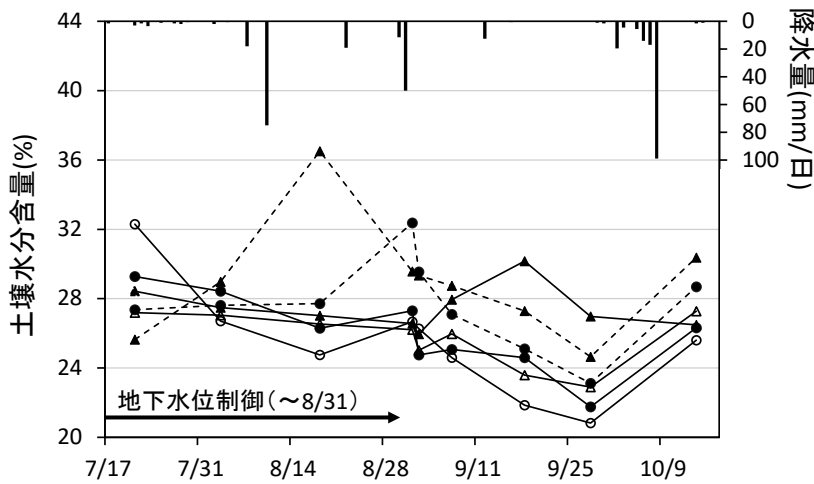


図1 降水量と土壤水分含量(2009年)

● FOEAS耕起:10cm ○ FOEAS不耕起:10cm ●- - 対照:10cm
 ▲ FOEAS耕起:20cm △ FOEAS不耕起:20cm ▲- - 対照:20cm

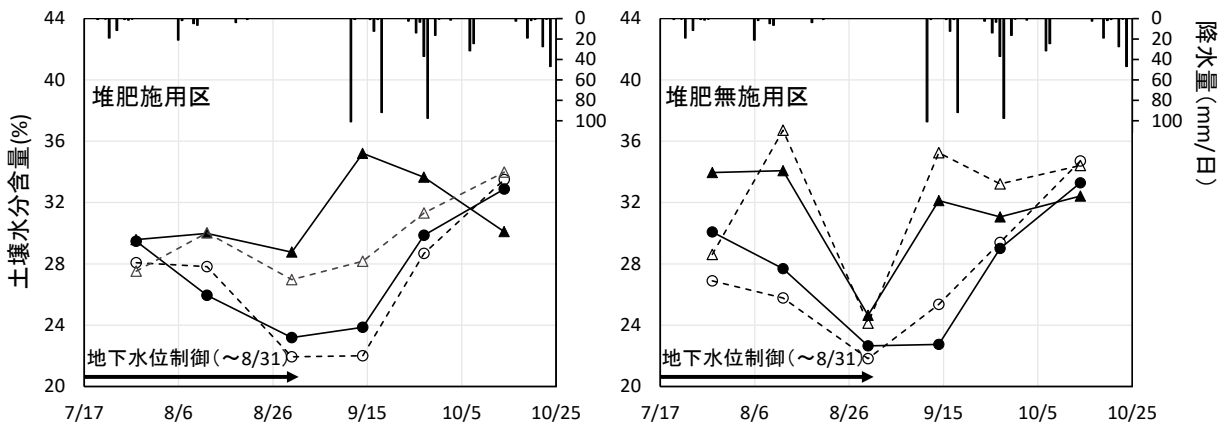


図2 降水量と土壤水分含有量(2010年)

● FOEAS-10cm ▲ FOEAS-20cm ○- - 対照-10cm △- - 対照-20cm

雨による変動も小さい傾向にあった。対照圃場耕起区では、8月10日の75mm降雨後の8月18日に20cmで、8月31日の50mm降雨後の9月1日に10cmで土壤水分含量がFOEAS圃場と比較し高くなった。これは対照圃場では排水に時間がかかっていることを示しており、FOEASによる排水性向上の効果が示された。これに対し、2010年は8月の降水量が極端に少なく、両圃場とも降雨があった8月上旬と比較し8月中下旬の10cmで土壤水分含量が低くなった(図2)。20cmの土壤水分含量は堆肥施用により高くなる傾向が見られた。最も乾燥した8月30日における10cm、20cmの深さの土壤

水分含量は、FOEAS圃場でやや高い傾向がみられた。なお、地下の補助孔(弾丸暗渠)に近い30cmの土壤水分含量はFOEAS圃場と対照圃場で明瞭な差はみられなかった(データ略)。ダイズ粗収量はFOEAS圃場堆肥処理区で $217.3 \pm 94.9\text{kg}/10\text{a}$ (ダイズ粗収量 \pm 標準偏差、以下同じ)、無堆肥区で $196.8 \pm 85.9\text{kg}/10\text{a}$ 、対照圃場堆肥処理区で $94.2 \pm 41.1\text{kg}/10\text{a}$ 、無堆肥区で $67.3 \pm 26.3\text{kg}/10\text{a}$ であり、対照圃場無堆肥区に対しFOEAS圃場での有意な収量増加(Tukey多重比較, $p < 0.05$)が見られた。島田ら⁽¹²⁾は、降水条件と地下水位がダイズ収量におよぼす影響の解析において、少雨年では地

下水位を高めた処理で多収であったと報告している。夏期に少雨であった2010年の結果は、島田ら⁽¹²⁾と同様に、FOEASからの水分供給による収量向上効果であると考えられた。

FOEASによる作土への水分供給および排水性の影響を評価するため、FOEAS圃場および対照圃場の無堆肥区より、作土直下の深さ20cmから採取した土壌コアサンプルを用いて、適当なpF条件における土壌水分含量を測定した。そして、横軸をFOEAS圃場、縦軸を対照圃場として各pFの土壌水分含量をプロットし、同一pFにおける土壌水分含量を比較した(図3)。作付け前の5月31日採取コアサンプル(以下5月サンプル)、9月1日採取コアサンプル(9月サンプル)、11月24日採取コアサンプル(11月サンプル)のいずれにおいても、同じpFでの土壌水分含量が対照圃場よりFOEAS圃場で高くなる傾向が確認された。両圃場において、5月サンプルと比較して9月サンプルの同じpFでの土壌水分含量が高くなったが、この変動は対照圃場の方が大きい。図3中のプロットから、易有効水分の範囲と考えられるpF1.8、2.0、2.5のプロットを用いて直線回帰を行ったところ、xをFOEAS圃場の、yを対照圃場の土壌水分含量とした回帰式は、5月サンプルで $y=0.67x+8.2$ 、9月サンプルで $y=0.52x+16.1$ となり、9月サンプル

で傾きが小さい。このことは、対照圃場での易有効水分量が9月に低下したことを示している。また、2010年試験圃場における深さ20cmの土壌コアサンプルの仮比重は、5月サンプルではFOEAS圃場のものが1.02、対象圃場のものが1.15だったのに対し、9月サンプルではFOEAS圃場のものが0.967、対象圃場のものが1.08であり、5月から9月にかけての土壌の仮比重の変化(減少)はFOEAS圃場の方が対照圃場に比べ、小さいものであった。これらのことから、FOEAS圃場は対照圃場に比べて、孔隙の変化など保水特性への影響が抑えられていたことが示唆された。ダイズは、栽培期間中の地下水水位の変動により減収する事例も報告されている⁽¹²⁾。地下水水位が安定していたFOEAS圃場よりも対照圃場でのダイズ粗収量が低下した一因と考えられた。

2. ダイズ栽培期間中の無機態窒素濃度と堆肥施用による可給態窒素への影響

2009年の播種前から9月下旬までの硝酸態窒素とアンモニア態窒素濃度の推移を図4に示した。FOEAS圃場耕起播種区では、8月中旬の10cmの硝酸態窒素濃度がおよそ乾土100gあたり3mgに上昇し、9月以降は1mgに低下した。20cmでは播種後から9月中旬まで1mgで安定していた。不耕

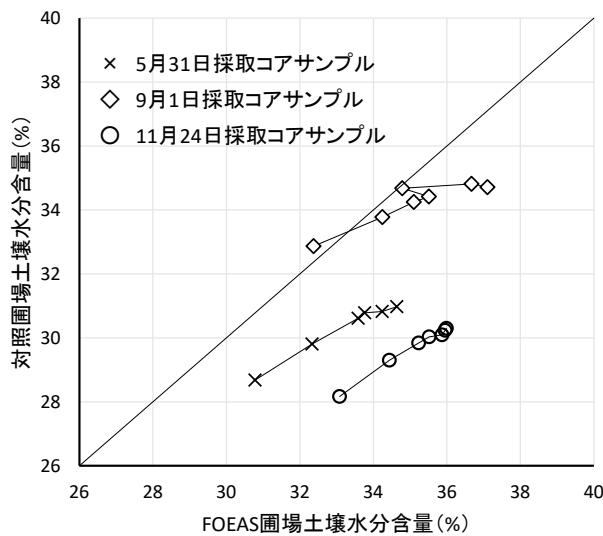


図3 同一pFでの土壌水分含量比較 (2010年、無堆肥区、土壌深さ20cm)

5月サンプルのプロットは高水分側よりpF1.0、1.5、1.8、2.0、2.5、3.0、9月および11月サンプルのプロットは高水分側より0.5、1.0、1.5、1.8、2.0、2.5、3.0の土壌水分含量を示す。pF値に従って直線で結んだ。

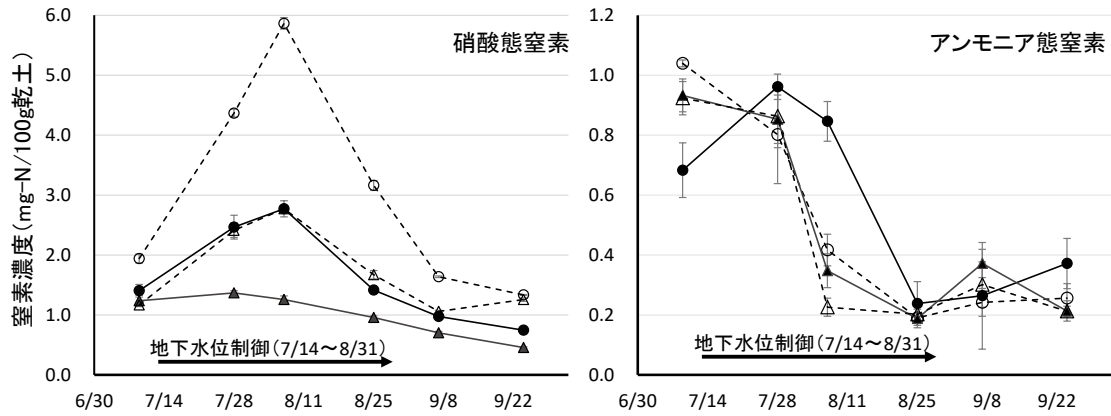


図4 無機態窒素濃度の変動(2009年7月-9月)

● FOEAS耕起:10cm ▲ FOEAS耕起:20cm ○ 対照:10cm △ 対照:20cm
 図中のバーは標準偏差(n=3)

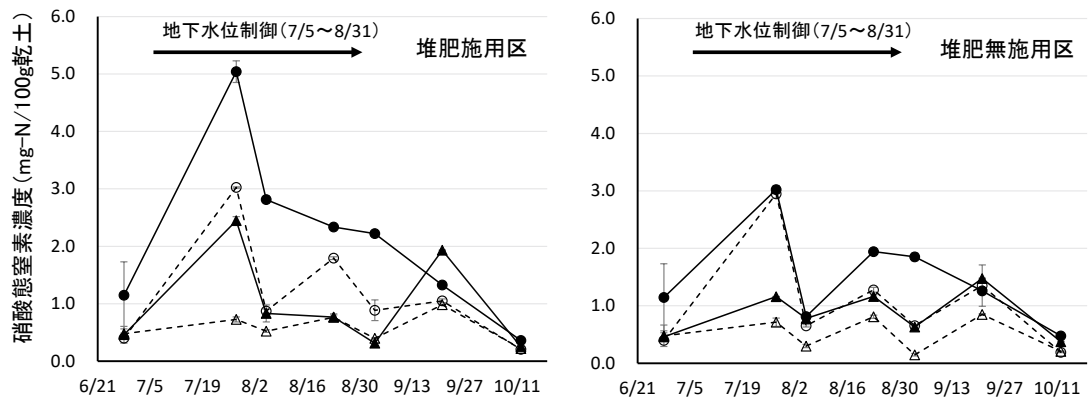


図5 硝酸態窒素濃度の変動(2010年6月-10月)

● FOEAS-10cm ▲ FOEAS-20cm ○ 対照-10cm △ 対照-20cm
 図中のバーは標準偏差(n=3)

起播種区でも同様の傾向であった(データ略)。それに対し対照圃場では、8月中旬に10cmで6mg, 20cmで3mgと高い値を示したが、用水の供給が止まった9月下旬にはFOEAS圃場とほぼ同等の値となった。アンモニア態窒素は、FOEAS圃場の10cmで8月中旬まで0.8mgと高い値を示したのに対し、対照圃場では8月初旬には低下した。これらの無機態窒素の変動から、肥料成分などのアンモニア態窒素の硝酸化成を経た溶脱が、FOEASによる地下水水位制御に伴う下層から表層への水分の移動によって低く抑えられた可能性が示唆された。

2010年の播種前から10月初旬までの硝酸態窒素の推移を図5に示した。FOEAS圃場の堆肥施用区で、10cmでは播種後か

ら9月中旬まで、20cmでは8月初旬まで対照圃場より高く推移した。またFOEAS圃場の10cm以外の処理区で9月中旬に上昇した。アンモニア態窒素濃度は、10月初旬まで0.4mg~0.8mgの値を示した(データ略)。2009年に確認された8月中旬以降の低下は各処理区で見られなかった。土壌水分含量の変動に伴い、硝酸化成能や脱窒能などの土壌微生物活性が変化することが亜酸化窒素発生動態の研究など(1,2)で明らかにされている。また、脱窒活性も乾燥による土壌の好気条件化によって低下する。2010年は8月中下旬の降雨量が少なく(図2)、土壌が乾燥していた。土壌水分含量の減少により8月に硝酸化成活性が低下することで、アンモニア態窒素濃度が高く維持された。さらに9月初旬の降

雨により硝酸化成活性が回復したため、9月中旬の硝酸態窒素濃度の上昇を招いたと考えられた。

また、8月中旬以降にFOEAS圃場の10cmでの硝酸態窒素濃度が対照圃場と比較して高く維持された。乾燥条件下においても微生物活性の停滞を抑え

る程度のFOEASによる地下からの水分供給があったことが考えられた。少雨条件でのFOEASによる給水効果は、作物への水分供給力の向上ばかりでなく、土壌微生物活性の安定化に寄与することも一因であることが示された。

IV 摘 要

FOEASを施工した現地調査圃場において2009年、2010年のダイズ栽培期間中の地下からの給水および播種時の牛ふん堆肥施用が土壌水分特性と無機態窒素の動態に及ぼす影響を検討した。結果は以下の通りである。

- (1) 2009年には耕起播種条件でFOEASによる排水効果が確認された。高温少雨であった2010年には夏期の乾燥条件下においてFOEASの地下灌

溉により対照区に比べて、わずかに土壌水分が高く維持され、ダイズが増収した。

- (2) 無機態窒素濃度の変動から、FOEASの給水機能による下層からの水分の上昇に伴う硝酸溶脱の低減と、乾燥による微生物活性への影響を緩和する可能性が示唆された。

V 謝 辞

本研究は農林水産省委託プロジェクト研究「水田の潜在能力発揮等による農地周年有効活用技術の開

発」3系（土壌養水分制御技術を活用した水田高度化技術の開発）の一部として行われた。

VI 引用文献

1. Chen Huaihai, Nape V. Mothapo and Wei Shi (2015) Soil Moisture and pH Control Relative Contributions of Fungi and Bacteria to N₂O Production. *Microb. Ecol.*, 69, 180–191.
2. Cheng Yi, Jing Wang, Shen-Qiang Wang, Jin-Bo Zhang and Zu-Cong Cai(2014) Effects of soil moisture on gross N transformations and N₂O emission in acid subtropical forest soils. *Biol. Fertil. Soils.*, 50, 1099–1108.
3. 茨城県農地部農地計画課(1983)“土壌図土浦”. 土地分類基本調査(土浦). 0805S.
4. 茨城県農業総合センター(2015)“II 土壌の診断基準”. 土壌・作物栄養診断マニュアル. 55.
5. 加藤雅康・国立卓生・濱口秀生・田澤純子・前川富也・島田信二・南田佳祐・東條元昭(2010)ダイズ播種後の湛水による出芽不良には卵菌類が関与する. 中央農業総合研究センター研究成果. (オンライン), 入手先 (<http://www.naro.affrc.go.jp/project/results/laboratory/narc/2010/narc10-57.html>), (参照2015-04-20).
6. 新良力也・廣川智子・小池潤・稲原誠・小田原孝治・兼子明・福島裕助・荒木雅登・荒巻幸一郎・大野智史・木村秀也(2009)田畑輪換圃の窒素肥沃度の低下と有機物施用対策技術. 中央農業総合研究センター研究成果. (オンライン), 入手先 (<http://www.naro.affrc.go.jp/project/results/laboratory/narc/2009/narc09-02.html>), (参照2017-03-7).
7. 新良力也(2010)“田畑輪換水田の現状と土壌管理についての問題提起”. 田畑輪換土壌の肥沃度と管理. 博友社, 10-23.
8. 農業環境技術研究所(1995)“IX 土壌統群, 土壌統一覧”. 農耕地土壌分類第3次改訂版. 39.
9. 農研機構中央農業総合研究センター(2014)水田輪作における地下水水位制御システム活用マ

ニュアル

10. 農林水産省統計部 (2015) "平成 26 年産大豆 (乾燥子実) の作付面積, 10 a 当たり収量". H26 農林水産省作物統計統計表. 8.
11. Shimada Shinji, Makie Kokubun, Hideaki Shibata and Shigeo Matsui (1992) Effect of water supply and defoliation on photosynthesis, transpiration and yield of soybean. *Jpn. J. Crop Sci.*, 61, 264-270.
12. Shimada Shinji, Makie Kokubun, and Shigeo Matsui (1995) Effect of water table on physiological traits and yield of soybean. *Jpn. J. Crop Sci.*, 64, 294-303.
13. 若杉晃介・藤森新作 (2009) 水田の高度利用を可能とする地下水位制御システム FOEAS. 農業農村工学会誌, 77, 7-10.
14. 若杉晃介. 地下水位制御システム FOEAS の開発および普及. 農研機構開発レポート. (オンライン), 入手先 ([https://www.naro.affrc.go.jp/collab/cllab_report/docu/report 12 .html](https://www.naro.affrc.go.jp/collab/cllab_report/docu/report12.html)), (参照 2015-04-20).

Inorganic Nitrogen and Soil Water Movement in FOEAS System for Soybean Cultivation Period

Hideya Kimura*¹, Tomiya Maekawa*², Rikiya Nira*¹,
Hideo Hamaguchi*^{2†} and Shinji Shimada*^{2‡}

Summary

The farm-oriented enhancing aquatic system (FOEAS), which consists of underdrain and sub-irrigation systems that keep groundwater levels stable, is innovative system used in upland field crop cultivation on paddy fields. In this study, we examined the effect of groundwater level controlled by the FOEAS on the dynamics of soil moisture and inorganic nitrogen during a cultivation period of soybean in 2009 and 2010.

In 2009, the precipitation was at usual levels during cultivation, and the drainage effect of the FOEAS was confirmed from the fluctuations in soil moisture. In 2010, despite the low rainfall, the yield of soybean was increased owing to the FOEAS. The dynamics of inorganic nitrogen indicated that the FOEAS affected the microbial activity through the control of soil moisture.

Received 20 May 2015, Accepted 10 October 2017

*1 NARO Central Region Agricultural Research Center, Soil Science and Plant Nutrition Division

*2 NARO Central Region Agricultural Research Center, Crop Production Systems Division

† Present address: NARO Headquarter

‡ Present address: NARO Central Region Agricultural Research Center, Department of Planning

