

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 27 年 5 月 29 日現在

機関番号：12601

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2012～2014

課題番号：24580019

研究課題名(和文) 輪作へのダイズ導入による土壌の窒素供給能の変動とその持続性

研究課題名(英文) The effects of soybean cultivation as one of rotation crops on the capacity of soil inorganic nitrogen supply

研究代表者

山岸 順子 (Yamagishi, Junko)

東京大学・農学生命科学研究科・准教授

研究者番号：60191219

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,300,000円

研究成果の概要(和文)：ダイズ栽培が土壌を肥沃化するか、収奪するかは、未解決の問題であった。そこで、根粒着生ダイズと非着生ダイズを用い、トウモロコシと比較の上、土壌の窒素供給力の変化を調べた。その結果、ダイズは栽培終了後に多くの可給態窒素を土壌に残し、根粒着生ダイズ>根粒非着生ダイズ>トウモロコシの順であった。土壌団粒構造の破壊程度と総呼吸量の増加も同様の順であり、ダイズは土壌団粒の破壊と微生物バイオマスの増加を通して土壌窒素の無機化を促進したと考えられた。また、ダイズ栽培後のオオムギの生育は、トウモロコシ跡より優れ、それは窒素吸収量の差によった。これらは、年次間差があるが、3年間について確認できた。

研究成果の概要(英文)：The cultivation of soybean was known to promote the growth of succeeded crops, though soybean absorbed so much nitrogen from soil with assimilated nitrogen by nodules. We examined the effects of soybean (nodulated and non-nodulated soybean) cultivation on soil properties. As results, inorganic nitrogen content in soil, soil aggregation destruction and soil respiration were highest under nodulated soybean cultivation, followed by non-nodulated soybean and then corn cultivation. The growth of barley was also better after soybean cultivation than corn cultivation, because barley could absorb more nitrogen. Therefore, we concluded that soybean produced inorganic nitrogen by reduction of soil aggregation and increase of microorganisms' biomass.

研究分野：作物学

キーワード：環境調和型農業 作付体系 無機化 無機態窒素 団粒構造 土壌肥沃度

## 1. 研究開始当初の背景

作物栽培圃場における作付体系の中に、マメ科作物を導入して輪作を行うことによって、土壌の疲弊(土壌肥沃度の低下)を回避できることは、古くローマ時代より世界的に経験として知られていた。このマメ科作物の導入について、19世紀末の根粒菌の発見とその接種効果の確認とによって、マメ科植物による土壌疲弊の回避は、根粒菌による共生窒素固定によるとされ、以後マメ科導入の効果は根粒菌の働きによっていると考えられてきた。アメリカでは、この現象を、「ダイズが後作の作物に N credit を与える」と表現している。しかしながら、近年、日本あるいはアメリカで、根粒非着生ダイズの後作においてもトウモロコシやムギ類といった作物の成長が優れることが示され、N credit には、根粒以外の要因も関与していることが示唆された(有原 2000; Kaye et al. 2007)。根粒非着生ダイズとの比較から、実際には N credit への根粒菌による窒素固定の寄与は非常に少ない(Bergerou et al. 2004)という報告もある。このことは、ダイズ(あるいはマメ科作物)の栽培により、根粒着生とは関係しない、よくわかっていない要因が、後作の作物に窒素栄養を提供していること(土壌の窒素肥沃度向上か?)を示している。しかしながら、一方で、ダイズ植物体とその生育期間に獲得する窒素量は非常に多く、土壌中にあった窒素を持ち去って減少させるという報告もある(Martens et al. 2006)。すなわち、ダイズは土壌中の窒素を減少させてしまうほど多くの窒素を吸収する作物であるにも関わらず、一方で後作の作物に N credit を与えるということになる。

日本においては、近年、ダイズは水田の転作作物として栽培されることが多い。この転換田におけるダイズ栽培においても、近年、土壌の肥沃度の低下が問題となってきており、窒素成分を多量に必要とするダイズが土壌窒素を収奪し、土壌が疲弊することが示されてきた(有原、2004; 高橋 2005)。これは、従来考えられてきたマメ科作物による土壌の肥沃化とは相反するものである。一方、畑地においては、申請者らの研究においてもトウモロコシ - オオムギ - ダイズ - オオムギの2年4作体系の中では、高いダイズ収量を得た後においても明らかにオオムギの収量はダイズの後作時の方がトウモロコシの後作時よりも高かった。そして、オオムギはダイズの後作でより多くの窒素を吸収していた。このように、ダイズ栽培による土壌の肥沃度の変化については、多様な結果が報告されており、それらの間には大きな不一致が認められた。

## 2. 研究の目的

上述のような背景のもとに、輪作体系へのダイズ(マメ科作物)導入が農地管理の持続性においてどのような意義と効果を持って

いるのかについて見直し、これらを検証することにより、輪作におけるダイズ導入が土壌肥沃度の維持および持続的農地管理に本当に貢献できるのか、また貢献できるとすればどのような条件においてなのかについて明らかにすることを本研究の目的とした。

そのために、通常の根粒着生ダイズと根粒非着生ダイズを用いて、トウモロコシ栽培と比較検証しながら、ダイズ栽培の導入によって土壌の窒素供給力が増加(減少)する実態を確認し、それがダイズによる窒素の付加(収奪)によるのかそれともその他の要因によるのか、さらにそれがダイズあるいは根粒のどのような作用によっているのかを分離できるような条件を用いること、さらに肥沃度の異なる畑圃場を対象として、土壌中の窒素化合物の挙動について違いがあるのかどうかについても調べることにした。

ダイズの後作への影響のメカニズムとして考えられる仮説は、次の4つが考えられる。1)ダイズ根と根粒の残渣あるいは根からの溢泌物による土壌有機物の増加 (Drinkwater et al. 1998; Schipanski et al. 2010) 2)土壌有機態窒素の無機化促進 (Bergerou et al. 2004; Gentry et al. 2001) 3) 土壌団粒の破壊 (Nakamoto et al. 2002) 4) 土壌微生物の活性化、である。

まず、通常の根粒着生ダイズおよび根粒非着生ダイズの栽培を行い、前述の仮説のうち、1)の一部、2)、3)を検証する。すなわち、土壌中に残される無機態窒素量を把握する。ここでは通常の根粒着生ダイズと根粒非着生ダイズの比較から根粒の果たす役割が定量できる。また、2)については、無作付け区との比較、および有機物に富む肥沃な黒ボク土とそれらが少ない心土との比較を通して、土壌中の不可給態窒素から可給態窒素への推移が明らかとなり土壌窒素の無機化促進量が推定できる。3)の土壌の団粒構造については、その破壊が土壌中の有機物を分解されやすくすると考えられ、団粒構造の変化を調べることにより、2)の無機化促進との関係から有機物分解促進のメカニズムを検討する。さらに土壌微生物についてその活性を把握し、2)の無機化との関係について検討する。

ダイズ栽培後の土壌を用いて、トウモロコシのポット試験により、予備試験の再確認を行うと共に、ダイズ栽培後の圃場にオオムギを栽培し、圃場での生育調査により、野外の現場での後作に対する影響の確認を行う。圃場においても黒ボク土と心土の違い、ダイズの根粒着生と根粒非着生の違い、さらにトウモロコシ栽培との比較から、不可給態有機物の分解促進と、それに対する根と根粒の役割の違いが明らかとなる。

ダイズ栽培導入によって起こる土壌の窒素肥沃度の改変についての効果が得られ、気象条件の異なる3年間のデータを取り、それらを再確認すると共に年次間差異について検討する。

### 3. 研究の方法

#### (1) 試験地

申請者の所属する東京都西東京市の東京大学大学院農学生命科学研究科附属生態調和農学機構の畑地圃場（北緯 35 度 43 分、東経 139 度 32 分）を用いた。

#### (2) 材料と圃場設計

土壌に対する根粒とダイズ植物体（地下部）自身の効果を比較するために、根粒着生ダイズ（エンレイ）と根粒非着生ダイズ（En1282、エンレイの突然変異体）を用いた。また、土壌とダイズの相互作用には土壌中の不可給態窒素量が関係すると考えられることから、有機物含量の高い肥沃な黒ボク土からなる圃場を中心として、それらの含有量が低い心土で造成された圃場も対象とした。黒ボク土では不可給態の窒素が非常に多く含まれていることから、ダイズが窒素の形態変化をもたらすならばその効果が顕著となることが期待された。また、比較のため、トウモロコシ栽培区と、無作付け区を設けた。初年度は黒ボク土とその心土である赤土で造成されている 2 つの隣接した畑圃場で、2 年目以降は黒ボク土圃場で、ダイズ 2 系統（エンレイとエンレイの突然変異体である根粒非着生系統 En-1282）とトウモロコシを栽培する区、無作付け区を含んだ 4 処理 3 反復で試験を行った。基肥として作物栽培区には全て同様に 2gN/m<sup>2</sup> 施肥した。

#### (3) 土壌とダイズ植物体の分析

土壌の窒素含量については、栽培前後の土壌について、全窒素を NC コーダにより、また無機態窒素（硝酸態窒素）に注目して電極法によって、測定した。また、ダイズが圃場より持ち去る窒素量の推定については、ダイズ植物体の乾物重が最大に達すると推定される登熟粒肥大盛期と完熟期にサンプリングを行い、部位別生育量および窒素含量を測定した。土壌は、開花終期・粒肥大盛期・収穫期に全窒素含有率・硝酸態窒素含有率と、栽培前後の耐水性土壌団粒の大きさを測定した。さらに、微生物バイオマスの指標として SIR(基質誘導呼吸)、三相分布と土壌硬度を測定した。なお、SIR は全量 (Total SIR) と、細菌の呼吸を抑制するために殺菌剤(クロラムフェニコール)を投与して測定を行い、細菌の呼吸 (SIR<sub>cp</sub>) とその他の微生物の呼吸 (SIR<sub>r</sub>) とに分けた。また、植物体からの距離別に測定し、根と根粒の影響を解析した。

#### (4) 後作による検定

ダイズ栽培後および無作付け区を用いて、トウモロコシを検定植物とするポット試験をダイズ収穫後、冬季に約 1 ヶ月にわたってハウス内で行った。さらに、栽培後の圃場において、冬作としてオオムギの無施肥栽培を登熟期までを行い、後作オオムギによる植物検定として窒素吸収量と乾物生産量を測定し、ダイズによる土壌の肥沃度変化の指標とした。

### 4. 研究成果

ダイズ（品種エンレイ）を栽培した後の黒ボク土を用いて検定用のトウモロコシのポット栽培を行った結果、施肥の有無に関わらず、トウモロコシの生長がダイズ栽培後の方がダイズを栽培しなかった場合よりも優れており、さらに窒素吸収量と有意な正の相関があった。一方、土壌の全窒素含量は、ダイズ栽培後の土壌の方が栽培しなかった土壌より低い傾向が認められた。すなわち、少なくともダイズ栽培後の土壌の窒素含量が増加することはなかったにも関わらず、後作の作物（トウモロコシ）の生長はダイズ栽培によって良くなったという結果であった。

また、後作として圃場で無施肥栽培したオオムギの生長と窒素吸収量をみると、やはりダイズ後作でトウモロコシ後作よりも生長が良く、窒素吸収量も多い傾向が明らかとなった（第 1 表）。これは試験を行った 3 年間において一貫して認められた。

第 1 表 後作オオムギ(2014 年)

前作	地上部重 (g m <sup>-2</sup> )	N 含有量 (g m <sup>-2</sup> )
エンレイ	465 b	5.44 a
En-1282	468 b	4.90 b
トウモロコシ	328 c	3.46 b
無作付	514 a	7.17 a
前作の影響	**	**

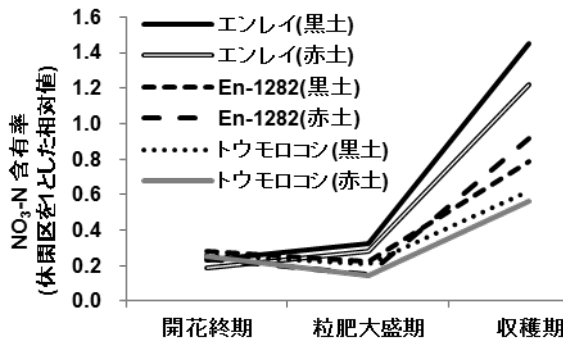
そこで、全窒素含有率に加え、土壌の可給態窒素である硝酸態窒素に注目し、ダイズとトウモロコシの生育期間中の土壌中の硝酸態窒素含有率を比較した。その結果について、第 2 表に示す。

第 2 表 土壌の全窒素含有率と硝酸態窒素含有率

土壌 系統/作物	NO <sub>3</sub> -N 含有率(mgN kg <sup>-1</sup> soil)			Total-N 含有率(gN kg <sup>-1</sup> soil)			
	開花終期	粒肥大盛期	収穫期	開花終期	粒肥大盛期	収穫期	
黒土	エンレイ	8.96 b	9.54 b	7.61 a	4.59	4.52	4.63 b
	En-1282	10.8 b	6.53 b	4.14 b	4.52	4.75	4.51 b
	トウモロコシ	9.86 b	6.07 b	3.26 b	4.66	4.72	4.61 b
	休閑	38.4 a	29.4 a	5.25 ab	4.75	4.76	4.86 a
赤土	エンレイ	6.60 b	7.48 b	4.82 a	3.27	3.59	3.69 a
	En-1282	8.43 b	3.99 b	3.61 ab	3.13	3.53	3.57 a
	トウモロコシ	8.81 b	3.80 b	2.23 b	3.34	3.68	3.52 a
	休閑	35.4 a	26.8 a	3.94 ab	3.37	3.51	3.85 a
土壌(S)	n.s.	n.s.	*	**	**	**	
系統/作物(L)	**	**	**	n.s.	n.s.	*	
S*L	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	

第 2 表より、作物栽培区的全窒素含有率は、ステージが進むにつれて減少傾向であり、硝酸態窒素含有率は、顕著に減少した。しかしながら、無作付け区（休閑区）との比較をみると（第 1 図）、粒肥大盛期から収穫期の土壌硝酸態窒素含有率は無作付け区に比べて

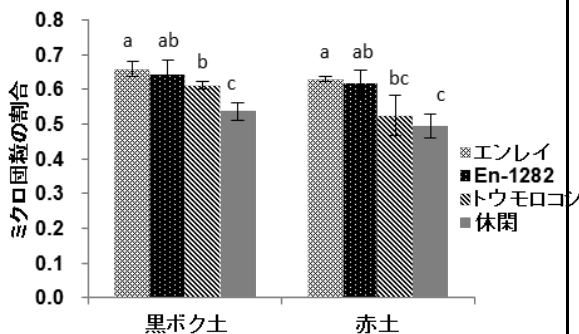
増加し、増加の割合はエンレイ > En-1282 > トウモロコシの順で高かった。第 2 表より、収穫期の硝酸態窒素含有率も同様の順番であった。したがって、このことから、エンレイ > En-1282 > トウモロコシの順で土壤窒素の無機化を促進している可能性が考えられた。



第 1 図 無作付け区(休閑区)と比較したダイズおよびトウモロコシ栽培区の硝酸態窒素含有率

En-1282 とトウモロコシの間にも無機化の程度に差があったことから、窒素固定を行わないダイズにおいても栽培によってトウモロコシより高い効果が土壤に及ぼされたと考えられた。

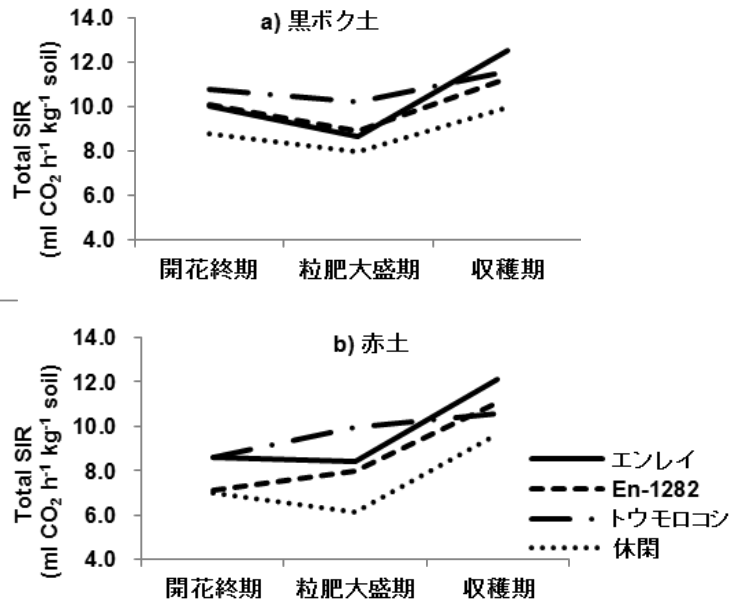
第 2 図より、収穫期の土壤の団粒構造の破壊の程度は黒ボク土でも赤土の瘠薄な土壤においても、ほぼ同様に、ダイズ栽培区、トウモロコシ栽培区、無作付け区(休閑区)の順でミクロ団粒の割合が高くなった。土壤団粒はミクロ団粒が結合してマクロ団粒を形成しているが、マクロ団粒を破壊してミクロ団粒に分解すると土壤窒素の無機化が促進されることが知られている。したがって、ダイズは土壤団粒の破壊を通して土壤窒素の無機化を促進していると考えられた。



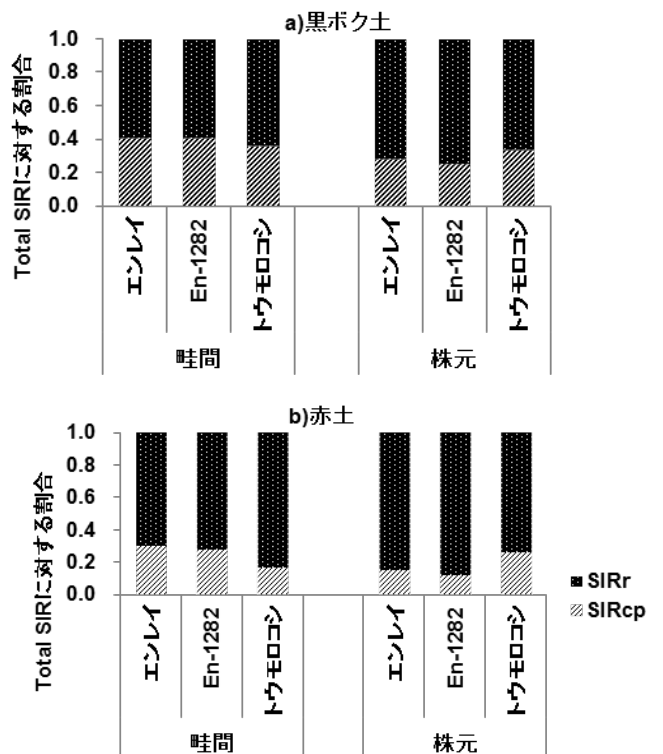
第 2 図 土壤団粒構造におけるミクロ団粒の割合

SIR(基質誘導呼吸)の結果を第 3 図に示した。Total SIR の増加の割合は、ダイズ栽培の方がトウモロコシ栽培よりも高かった。土壤微生物バイオマスが増加すると土壤窒素の無機化量も増加することがわかっていることから、ダイズは土壤団粒の破壊に加えて、

微生物バイオマスの増加を通して土壤窒素の無機化を促進していると考えられた。また、第 4 図より、微生物相については、収穫期のダイズ 2 系統の土壤はトウモロコシよりも細菌の割合が高かった。メカニズムは不明だが、土壤窒素の無機化は微生物相の違いの影響を受けている可能性があった。



第 3 図 全 SIR(基質誘導呼吸)



第 4 図 細菌の呼吸 (SIRcp) とその他の微生物の呼吸 (SIRr) の割合

土壌の物理性である三相分布と硬度については、土壌窒素の無機化との関連性は見られなかった。

エンレイと En-1282 を比較すると、エンレイのほうが En-1282 よりも粒肥大盛期以降の土壌窒素の無機化を促進しており、また後作の作物の生長量も大きかった。エンレイと En-1282 の差は一義的には根粒の有無であるが、実際には植物体の大きさがエンレイの方が大きく、したがって、根粒の有無による差異と、根系の大きさによる差異の両者に関係していると考えられた。また、黒ボク土と赤土では全窒素含有率・硝酸態窒素含有率・三相分布・SIR などについてほぼ同様の傾向が得られた。したがって、得られた結果は、土壌の肥沃度や有機物含有量などの土壌の性質による影響は受けず、栽培した作物あるいは無作付けによるものと考えられた。

Drinkwater et al. (1998)などによれば、マメ科作物はイネ科作物よりも土壌中に炭素化合物を多く蓄積する。そのため、有機態窒素も多く蓄積する可能性があり、イネ科に比べて土壌を肥沃化する可能性がある。しかしながら、地下部（根）の量は一般にマメ科、特にダイズはトウモロコシなどに比較すると貧弱であり、大きくないことが知られている。したがって、考えられるメカニズムとしては、根（あるいは根粒？）からの溢液、枯死脱落などである。今後の研究として、これらの地下部から土壌に添加される炭素量あるいは窒素量の見積もりを、根粒着生および非着生ダイズの比較も行いながら行く必要がある。特に、根粒が空気中の窒素から生成した有機態窒素はアミノ酸の一種のアラントインという形態で運ばれることが知られているが、土壌に対しても低分子の有機態窒素を付加するか否かについてはわかっておらず、否定はできない。

以上、本研究により、ダイズ栽培が土壌窒素の無機化を促進して、それが後作の増収をもたらしている可能性が示された。さらに、網羅的に土壌の性質を調査した結果、団粒構造や微生物バイオマスなどについてダイズ栽培による効果が認められ、これらが土壌窒素の無機化促進に影響を与えたと考えられた。これらは、年次間差があるものの、3年間について確認できた。これらのことより、輪作体系にダイズ(マメ科)を導入することは必ずしも農地管理の持続性を高めるわけではないことが明らかとなった。すなわち、ダイズ導入により、土壌窒素の無機化は促進され、後作の生長は増加するが、土壌中の窒素含量は減少すると判断され、そのことは持続性とは相反するものである。つまり長期にわたる効果は期待できないという結論となる。ダイズの収量レベルが問題であるという指摘もなされているが、これはすなわちダイズによる土壌からの窒素持ち出し量を問題としている。今後さらに定量的な推定がなされる必要がある。

## 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計 0 件)

[学会発表](計 1 件)

森田千恵\*・山岸順子(2013)ダイズ栽培が畑土壌に与える影響．日本作物学会紀事 82(別1):- 3月28日 明治大学農学部

## 6. 研究組織

### (1)研究代表者

山岸 順子 (YAMAGUSHI Junko)  
東京大学大学院・農学生命科学研究科・准教授

研究者番号：60191219

### (2)研究分担者

岡田 謙介 (OKADA Kensuke)  
東京大学大学院・農学生命科学研究科・教授

研究者番号：80391431