

ダイズ 2つの問題点をクリアした2つの方法

《深層施肥と根粒菌接種》～その効果を新潟5圃場で確認～

新潟大学農学部 大山卓爾・ティワリカウサル・高橋能彦

自給率は3～5%なのに能力が活用されていない

ダイズは、豆腐、納豆、みそ、醤油など、わが国の伝統的食品材料として欠かせないだけでなく、近年、食用油や飼料、工業用原料として世界的に生産が増加しており、世界の年間生産高は2億tを超えた。

わが国でも、ダイズは主要な水田転作作物として位置づけられ、栽培面積は徐々に増加してはいるが、年間消費量約500万tに対し、国内年間生産高は約15～25万tと自給率は3～5%程度に過ぎない。

ダイズは、10a当たり600kgもの子実収量が得られることもあるが、実際の生育収量は不安定で、わが国の平均収量は200kg/10aを下回り、ダイズの持つ潜在的な生産能力を十分活用できていない。ダイズ子実は、タンパク質を高濃度に含むため、子実収量は窒素同化量と比例関係にあり、子実1tを生産するのに、約70～90kgと大量の窒素を必要とする。

また、生育期間全体の窒素同化量の約8割を開花までに吸収するイネとは反対に、ダイズでは、開花期以降に全窒素の約8割を同化するため、生育後半の窒素供給の多少が子実収量に大きく影響する。

問題点1 根粒だけに頼ると収量増につながらない

ダイズは、マメ科作物の特徴として、土壌微生物である根粒菌との共生的窒素固定により、空中窒素を固定利用できるというすぐれた能力を持っている。ところが、実際には、土壌や肥料からの窒素供給量は限られるため、それだけでは、一般に10a当たり50～100kg程度の子実収量しか得られない。高い収量水準を得るには、窒素固定を十分に活用する必要がある¹⁾。

しかしながら、窒素源を根粒の窒素固定だけに頼ると、窒素固定開始までの初期生育の不良や登熟期における根粒活性の早期低落により、旺盛な茎葉部の生長や高い子実収量が得られない場合が多い。

問題点2 施肥窒素だけでは頼れない

一方、多量の窒素肥料を施肥すると、根粒の着生や窒素固定活性を抑制するだけでなく、徒長や過繁茂、青立ちを引き起こし、収量増につながらない。追肥が試みられているが、効果は必ずしも安定しない。初期生育を助けるための少量のスターター窒素(2kgN/10a程度)の施用が一般的である。

被覆尿素のかわりに石灰窒素の深層施肥で

高橋能彦らは、緩効性窒素肥料の被覆尿素(LP-100、10kgN/10a)を播種列直下、地表下約20cmの位置に条施肥するダイズの新規施肥法(写真-1)を考案し、慣行栽培よりも一貫して多収が得られることを報告した^{2)、3)}。

1990年の新潟県農業試験場(長岡市)における圃場試験では、慣行区収量が480kg/10aに対し、深層施肥区は592kg/10aと高い子実収量が得られた。Tewariらは、2001年に被覆尿素のかわりに石灰窒素を用いることができるかどうかを3カ所で試験し、石灰窒素の深層施肥効果を検討した。

○長岡市にある新潟県農業総合研究所の水田転換畑(転換初年度⁵⁾)

○新潟県営圃場整備事業の道路工事から排出された残土を30cmの厚さに客土として上乗せして造成された長岡市桂町の低地圃場⁶⁾

○新潟市五十嵐の新潟大学農学部砂丘地圃場⁷⁾

石灰窒素(10kgN/10a)を播種直下、地表下約20cmの位置に施肥した。試験では、比較のために尿素、被覆尿素の深層施肥区と深層施肥しない慣行区を設けた。ダイズの品種は、北陸地域の主力品種である「エンレイ」を用いた。

同時に、根粒菌の接種方法として、ペーパーポットで育成した苗を移植する方法の試験をおこなった。高さ13.5cm、直径3cmの蜂の巣状のペーパーポットにパーミキュライトを詰め、ダイズを播種すると同時に根粒菌(USDA110株)培養液1mLを添加した。播種10日後の移植までに接種した根粒菌が増殖し、移植以降も高い密度で存在することが期待される。根粒菌接種ペーパーポット区(接種PP区)との比較のため、根粒菌を接種しないペーパーポット苗移植区(非接種PP区)と根粒菌接種箱苗移植区(箱苗区)を設けた。箱苗区は、パーミキュライトを詰めた箱に根粒菌を接種した種子を播種し、10日後の苗を傷つけないように抜き取って直接移植した。

3つの圃場における子実収量を図-1に示した。子実収量は、どの圃場でも慣行区よりも尿素施肥区がまさり、被覆尿素区と石灰窒素区がさらに上回った。

根粒菌の接種方法で収量を比較すると、おおむね非接種PP区<箱苗区<接種PP区の順であった。

写真1 ダイズ用深層施肥機



被覆尿素と石灰窒素で慣行区の2倍近い収量

水田転換畑

水田転換畑で実施した施肥試験⁵⁾では、畦幅75cm、株間27cmの1本立てで栽培した(栽植密度:5株/m²)。基肥としてダイズ化成肥料(硫安1.6kgN/10a、60kg P₂O₅、80kgK₂O)を作土約10cmに全層施用した。深層施肥区では、約20cmの深さに穴を掘り、尿素、被覆尿素(LP-100)または石灰窒素を10kgN/10a相当量を施肥し、土壌を深さ10cm程度まで入れて、その上にペーパーポット苗または箱苗を移植した。

写真-2に接種PP区の植物を示した。栽植密度を低くしたためか、黄葉期における主茎長は30cmから40cmと短く、主茎の太さは11.5mmから14.4mmと、ずんぐりした生長を示した。莢は、茎上部に集中的に着生した。子実収量(図-1上段)を同じ施肥区でくらべると、接種PP区がもっとも高く、非接種PP区がもっとも低い傾向を示した。

長岡市の圃場では、非接種PP区にも根に土着根粒菌による根粒が着生していたことから、接種PP区の収量が高かった理由は、窒素固定効率のよい菌であるUSDA110株がパーミキュライト内で増殖し、根粒形成に土着菌よりも優先したためと考えられる。箱苗区でも、初期の根粒はUSDA110株の割合が高いが、徐々に土着菌が着生したため、接種PP区に比べるとやや収量が劣ったのではと考えられる。

肥料区を比較すると、被覆尿素区と石灰窒素区が、慣行区の2倍近い収量を示した。尿素区でも、慣行区よりも収量が高まったが、被覆尿素区、石灰窒素区よりは低かった。表-1に示すように、収量構成要素では、莢数、莢当たり子実数、子実数、100粒重ともに、被覆尿素と石灰窒素の深層施肥で慣行区を上回ったが、増収は主に株当たりの莢数の増加に起因した。

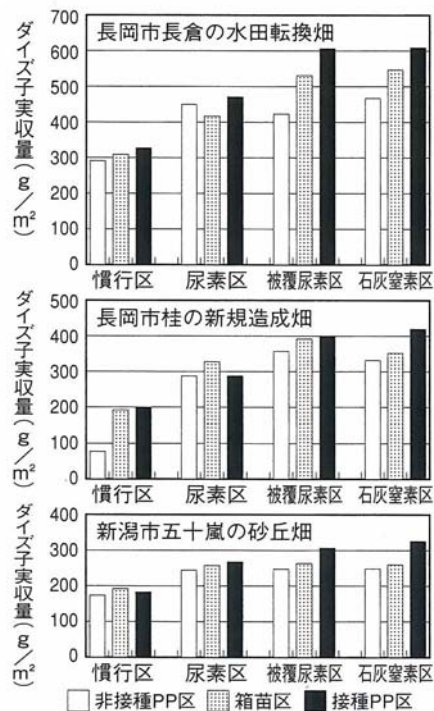


図-1 新潟県内3圃場における窒素肥料の深層施肥と根粒菌接種方法の違いによるダイズ子実収量

表-1 長岡の水田転作畑の施肥試験におけるダイズの子実収量と収量構成要素

根粒菌接種方法	肥料	子実収量	莢数	莢当たり子実数	子実数	100粒重
		(g/m ²)	(個/m ²)	(個)	(個/m ²)	(g)
根粒菌接種PP	慣行区	331b	540b	1.9a	1135b	29.2b
	尿素区	467b	696b	2.0a	1407b	33.2a
	被覆尿素区	604a	807a	2.2a	1747a	34.6a
	石灰窒素区	612a	844a	2.3a	1754a	34.9a
根粒菌接種移植	慣行区	314b	580b	1.8a	1059b	29.7b
	尿素区	422ab	626b	2.2a	1387b	30.4a
	被覆尿素区	535a	795a	2.2a	1694a	31.6a
	石灰窒素区	541a	758a	2.2a	1692a	32.0a
根粒菌非接種PP	慣行区	288b	567b	1.7a	973b	29.6b
	尿素区	453a	690a	2.1a	1496a	30.3a
	被覆尿素区	429a	778a	2.1a	1337a	32.1a
	石灰窒素区	460a	702a	2.1a	1494a	30.8a

根粒菌接種なしでも石灰窒素区は収量増加

客土造成圃場

長岡市桂町では、道路工事残土を30cmの厚さに客土して造成された低地圃場で試験をおこなった⁶⁾。

客土中には、ダイズ根粒菌は検出されなかった。客土後の初作にダイズ(品種「エンレイ」)を栽培している1区画1haの大規模圃場の一部で、窒素肥料の深層施肥試験をおこなった。

根粒が着生しなかったため、本圃場におけるダイズの生育はきわめて貧弱であった。長岡転換畑の試験と同様根粒菌の接種および移植方法としては、非接種PP区、箱苗区、接種PP区の3通りを用いた。栽植密度は9株/m²(畝間75cm x 株間15cm)で1本植えとした。窒素深層施肥処理では、石灰窒素区、被覆尿素区、尿素区、および慣行区を設けた。

写真-3に、収穫したダイズの一部の区の外観を示した。慣行区の子実PP区ダイズは生育が著しく劣り、分枝をほとんど形成

しなかった。また、窒素不足のため早期に成熟し、葉がすべて落ちて莢が茶色を呈した。慣行区において、接種PP区と箱苗区では、根粒着生による明らかな生育促進効果がみられ、分枝への莢の着生数が増加した。尿素区は、無窒素区よりも生育が良好となった。被覆尿素区と石灰窒素区では、さらに旺盛な生育を示し、多数の分枝と莢の着生が認められた。石灰窒素区では、根粒菌接種方法によらず、緑色の葉がもっとも多く残っており、深層施用した石灰窒素からの窒素の持続的供給が、葉の寿命と光合成活性の維持に貢献したと考えられる。これまで被覆尿素的の深層施肥でも、慣行区にくらべて葉の寿命と光合成活性が長期に維持され、生育最終段階における窒素と炭素の種子への集積が促進されることが示唆されている。

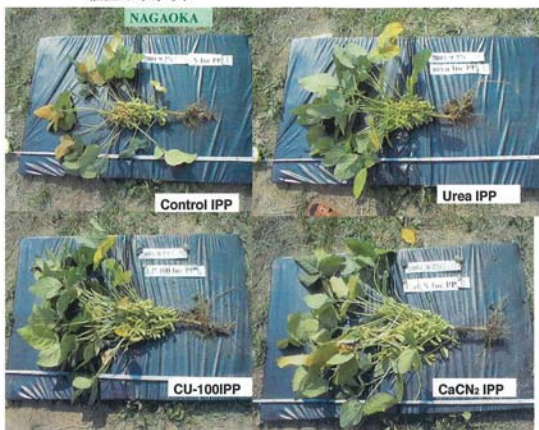
本試験における観察結果から、石灰窒素深層施肥による葉の活性の維持効果は、被覆尿素深層施肥と同等またはそれを上回った。

客土圃場の子実収量(図-1中段)については、慣行区の子実収量(80g/m²)については、慣行区の子実収量(80g/m²)よりも、根粒菌による窒素固定がおこなえなかったため、きわめて低かった(80g/m²)。慣行区でも、根粒菌を接種することにより、2倍以上の子実収量(200g/m²)が得られた。根粒菌を接種した区と非接種の子実収量の差は、根粒形成により窒素が供給された結果であると判断できる。子実収量は、尿素深層施肥区で約300g/m²、被覆尿素区と石灰窒素深層施肥区で340g~420g/m²に増加した。窒素含有率は、窒素施肥法、根粒菌接種方法にかかわらず、処理間に有意な差は認められなかった。

砂丘地圃場

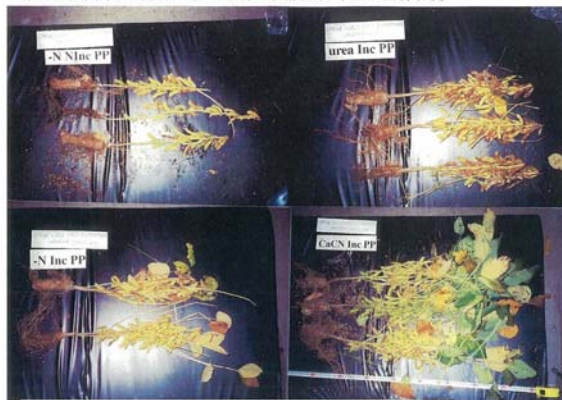
新潟市五十嵐の砂丘地圃場⁷⁾における試験(図-1下段)では、収量は全体的に長岡の水田転換畑よりも低かったが、石灰窒素深層施肥により慣行区よりも高い収量が得られ、被覆尿素深層施肥と同等の効果を示した。同じ施肥区で根粒菌接種方法を比べると、接種PP区がもっとも収量が高く、ついで箱苗区がつづき、非接種PP区がもっとも低かった。

写真2 長岡の水田転換畑におけるダイズ(根粒菌接種ペーパーポット移植区のみ示す)



左上: 慣行区、右上: 尿素区、左下: 被覆尿素区、右下: 石灰窒素区

写真3 長岡市桂町の客土畑における試験区ダイズの生育状況



左上: 慣行区、非接種ペーパーポット移植区
左下: 慣行区、接種ペーパーポット移植区
右上: 尿素区、接種ペーパーポット移植区
右下: 石灰窒素区、接種ペーパーポット移植区

石灰窒素の深層施肥で突出した窒素集積・収量

農総研水田転換畑

緩効性窒素肥料の深層施肥が、ダイズ生育と子実収量におよぼす促進効果について、窒素栄養面から解析するため、¹⁵N希釈法による固定窒素、土壌由来窒素、施肥窒素の分析をおこなった⁹⁾。本実験は、2002年に長岡の新潟県農業総合研究所の水田転換畑でおこなった。肥料は、硫安、尿素、被覆尿素、石灰窒素を地表下20cmに施用し、ダイズ品種「エンレイ」とその根粒非着生系統のEn1282を同じ畦に交互に植えた。

本実験では、ペーパーポットは用いず、播種時に根粒菌を種子接種した。成熟始期に植物を採取し、部位ごとの¹⁵N濃度と窒素濃度を測定した。「エンレイ」における固定窒素由来窒素、土壌窒素由来窒素、肥料窒素由来窒素を、En1282を対照植物として¹⁵N希釈法で計算した。

「エンレイ」もその非着生系統も、石灰窒素の深層施肥で植物生育と窒素集積がもっとも促進され、ついで被覆尿素、尿素、硫安の深層施肥区の順に効果が高かった。「エンレイ」の子実収量も、石灰窒素の深層施肥でもっとも高く(650g/m²)、ついで被覆尿素区(561g/m²)、尿素区(418g/m²)、硫安区(329g/m²)、慣行区(231g/m²)の順であった。

各深層施肥区における¹⁵N希釈法で求めた由来別窒素量を図-2に示した。ここで注目すべき点は、被覆尿素、石灰窒素由来の窒素は、硫安、尿素よりも多いが、全同化窒素の約1割程度にしか過ぎない。石灰窒素の深層施肥が、窒素固定と、土壌窒素の吸収を促進していることが重要

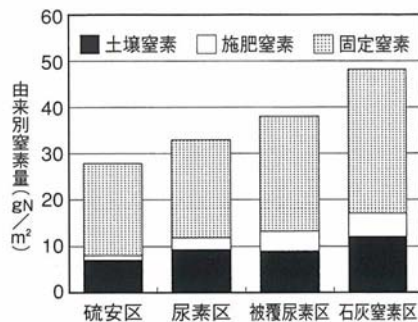


図-2 ¹⁵N希釈法による土壌窒素、施肥窒素、固定窒素由来窒素量

である。1m²当たりの窒素固定由来窒素は、石灰窒素(32g N)と被覆尿素(25gN)で、尿素(21gN)、硫酸(20gN)より高かった。施肥した肥料の利用率は、石灰窒素(43%)と被覆尿素(36%)で尿素(21%)と硫酸(8.5%)より高かった。これらの結果から、石灰窒素と被覆尿素的の深層施肥は、生育後期まで深層部から化合態窒素を効率的に供給するだけでなく、根粒の窒素固定や根による窒素吸収を増加させることによって同化窒素量を増やし、子実収量増に寄与することが明らかとなった。

品質向上・「しわ粒」防止に深層施肥の有効性を示唆

新潟大水田転換畑

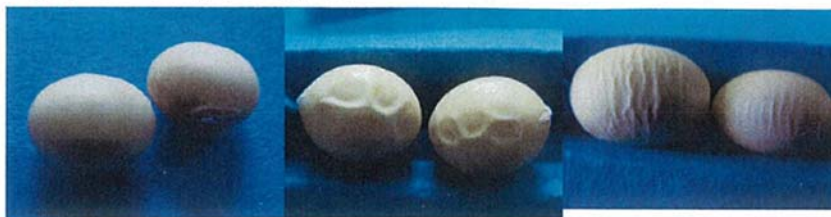
ダイズについては全国的に低品質が大きな問題となっており、なかでも種皮にしわが入る「しわ粒」が、北陸地域の転換ダイズの品質低下の最大の要因となっている。しわ粒には、写真-4のように、亀の甲羅状の「亀甲しわ」と、横にすじ状に並んだしわが入る「ちりめんじわ」の2つのタイプがある。なお、普通ダイズの等級区分では、被害粒などの混合率15%、20%、30%までをそれぞれ、1等級、2等級、3等級としている。新潟県では、近年、高品質とされる1等級と2等級の合計割合が10%程度ときわめて低い。

転換畑で、尿素と被覆尿素的の施肥位置がダイズ種子の収量・品質におよぼす影響について調べた⁹⁾。実験は2002年に新潟大学農学部フィールド科学教育研究センター新通ステーションの水田転換畑でおこなった。

施肥区は、慣行区に加えて、尿素(10kgN/10a)と100日タイプの被覆尿素LP-100(10kgN/10a)の全層施肥区と深層施肥区を設けた。収穫したダイズ種子の収量と外観的品質を調査した。乾物重当たりの整粒比率は、対照区51%、尿素全層施肥区65%、被覆尿素全層施肥区61%、尿素深層施肥区61%、被覆尿素深層施肥区66%であり、被覆尿素深層施肥区でほかの区よりも整粒の割合が高まった。窒素の施用により、しわ粒(亀甲しわ)と皮切れ粒の比率が低下した。

これらの結果から、ダイズの収量と種子品質向上の両面から、緩効性窒素肥料の深層施肥の有効性が示唆された。その後、同様の品質改善効果が石灰窒素の深層施肥でも得られている。しわ粒発生機構はまだ解明されていないが、生育後期の窒素や光合成産物の不足や、カルシウム、ホウ素などの養分欠乏が関係することが予想されている。石灰窒素の深層施肥は、生育後期の窒素、光合成産物の栄養状態を改善するとともに、石灰窒素に含まれるカルシウムが、しわ粒を防止する効果も期待される。

写真 4 ダイズのしわ粒



左：整粒、中：亀甲しわ粒、右：ちりめんしわ粒

硝酸による阻害がなく促進された窒素の固定

被覆尿素(LP-100)の深層施肥による増収効果は、深層施肥した肥料が開花以降に効率的に吸収されることと同時に、窒素肥料、とくに阻害効果強い硝酸態窒素が、地表部近傍に多く着生する根粒と直接接せず、窒素固定を阻害しないことによると考えられている。また、被覆尿素的の深層施肥により、施肥位置近辺の深根の発達を促し、深層部からの養水分吸収が確保される。

さらに、生育後半に肥料窒素が継続的に供給されるため、葉面積が維持され、クロロフィル含量が保持されるため、多量の光合成産物が終盤まで供給される。このことにより、慣行区では、窒素固定が低下する9月まで窒素固定活性が維持される。これらの結果、分枝数、節数、節当たり莢数が増加し、結果的に粒数が増加することが、多収の要因である。被覆尿素的の深層施肥部近傍には、被覆尿素から溶出した尿素から生じたアンモニアが集積していたが、根粒が多く着生した地表部近くには、無機態窒素(硝酸+アンモニア)がまったく蓄積していなかった⁴⁾。転換畑下層土では硝化能が低いため、被覆尿素から溶出した尿素はアンモニアの形態でとどまり、流亡や脱窒が少なかったと考えられる。化合態窒素、とくに硝酸による根粒肥大と活性の阻害は、直接硝酸と接触する部分で強くあらわれる。したがって、根系上部では主に窒素固定を、根系下部では無機態窒素吸収という役割分担をさせることにより、窒素固定がむしろ促進されると予想された。

このことを確認するために、ダイズを二重のポットで栽培し、下部根からの継続的な硝酸投与が、上部根の根粒形成と窒素固定にあたる影響を調べた¹⁰⁾。下部ポットに連続して硝酸1mMを含む水耕液をあたえたところ、上部根の根粒乾物重は、無窒素培養液をあたえた区を上回った。着莢始の株当たりの上部根粒の窒素固定活性も、硝酸1mM区が最高値を示した。この結果、低濃度の硝酸が持続的に下部根から供給されると、上部根の根粒形成と窒素固定を促進することが確認された。ただし、高濃度の5mM硝酸培養液を下部ポットから連続的にあたえると、上部ポットの根粒重と活性は抑制された。

圃場条件や土壌型で施肥位置と量の検討が必要

深層施肥した石灰窒素の土壌中の挙動については、まだ十分調べられていない。石灰窒素は、土壌中で、シアナミド、尿素を経てアンモニアに変化するが、石灰窒素の分解過程で生成するジシアンジアミドには、硝酸化成抑制作用がある。硝酸はアニオンとして土壌中を移動しやすく、しかもダイズにおける根粒形成と窒素固定は、ともに培地中の硝酸の存在により可逆的に、かつ強く抑制される。石灰窒素の深層施用により、無施用の慣行区や尿素区よりもダイズの株当たり子実窒素同化量を増加さ

せたことは、石灰窒素の硝化抑制作用により、硝化、流亡、脱窒が抑制され窒素が施肥位置近傍に長くとどまり利用率が高まったことと、根粒肥大と窒素固定活性が抑制されなかったためと考えられる。

また、高濃度の石灰窒素は、植物と直接接触すると、発芽、発根などに対する阻割作用があるが、深層施肥では、播種位置と施肥位置が離れているためにこれらの害作用が回避されたと思われる。

石灰窒素(10kgN/10a)の深層施肥による根粒の窒素固定を活用したダイズ増収と品質改善の可能性が示されたが、今後、実用技術として確立するには、圃場条件や土壌型による石灰窒素の施用位置や施肥量の検討が必要である。また、石灰窒素の深層施肥は、肥料利用率が高く、環境保全にも役立つことから、ダイズだけでなく、比較的生育期間の長い作物一般に適用できると思われる。さらに、トラクターに装着する深層施肥播種ユニットの量産と普及が望まれる。

謝辞:本研究を進めるにあたり、日本石灰窒素工業会、農林水産省高度化事業、タカノ農芸化学研究助成の御援助を頂きましたので、厚く御礼申し上げます。

●引用文献

- 1)大山卓爾2001ダイズの特性と収量の考え方、転作全書第2巻181-214(農文協)
- 2)高橋能彦・池主俊昭・中野富夫・大山卓爾1993緩効性窒素肥料(被覆尿素)の深層施肥によるダイズ安定多収技術の植物栄養学的解析、農業および園芸、68、282-288
- 3)高橋能彦2005ダイズの窒素施肥と安定多収技術、「ダイズの生産・品質向上と栄養生理」11-38博友社
- 4)高橋能彦・池主俊昭・中野富夫・大山卓爾1993ダイズ栽培圃場において追肥または深層施肥した被覆尿素的土壌における動態、日本土壌肥科学雑誌、64、338-340
- 5)Tewari,K., Suganuma,T., Fujikake,H., Ohtake,N., Sueyoshi,K., Takahashi,Y., and Ohyama,T. 2002 Effect of deep placement of calcium cyanamide, coated urea, and urea on soybean (Glycine max (L.) Merr.) seed yield in relation to different inoculation methods, Soil Sci. Plant Nutr., 48, 855-863
- 6)Tewari, K., 皆川律子・菅沼丈人・藤掛浩行・大竹憲邦・末吉邦・高橋能彦・土田徹・大山卓爾 2003 窒素深層施肥と根粒菌接種が客土造成転換畑初作ダイズに及ぼす影響、日本土壌肥科学雑誌、74、183-189
- 7)Tewari, K., Suganuma, T., Fujikake, H., Ohtake, N., Sueyoshi, K., Takahashi, Y., and Ohyama, T. 2004 Effect of deep placement of N fertilizers and different inoculation methods of Bradyrhizobia on growth, N₂ fixation activity and N absorption rate of field grown soybean plants, J.Agronomy and Crop Science, 190,46-58
- 8)Tewari, K., Onda, M., Ito, S., Yamazaki, A., Fujikake, H., Ohtake, N., Sueyoshi, K., Takahashi, Y., and Ohyama, T. 2004 Effect of placement of urea and coated urea fertilizers on yield and quality of soybean(Glycine max (L.) Merr.) seeds. Soil Sci. Plant Nutr., 50, 1245-1254
- 9)Tewari, K., Onda, M., Ito, S., Yamazaki, A., Fujikake, H., Ohtake, N., Sueyoshi, K., Takahashi, Y., and Ohyama, T. 2005 ¹⁵N analysis of the promotive effect of deep placement of slow-release N fertilizers on growth and seed yield of soybean. Soil Sci. Plant Nutr., 51, 885-892
- 10)Yashima, H., Fujikake, H., Yamazaki, A., Ito, S., Sato, T., Tewari, K., Ohtake, N., Sueyoshi, K., Takahashi, Y., and Ohyama, T. : Long-term effect of nitrate application from lower part of roots on nodulation and N₂ fixation in upper part of roots of soybean (Glycine max (L.) Merr.) in two-layered pot experiment, Soil Sci.Plant Nutr., 51,981-990(2005)