

2. 窒素施肥法が子実成分集積としわ粒発生に及ぼす影響

○大山卓爾^{1,2}・大竹憲邦¹・末吉 邦¹・ティワリ カウサル^{1,3}

・南雲芳文⁴・土田 徹⁵・高橋能彦¹

(¹新潟大学農学部 自然科学研究科 ²日本原子力研究開発機構

³Centre for Plants and the Environment, University of Western Sydney,

⁴新潟県農総研 作物研 ⁵新潟県農総研 佐渡農技)

1) はじめに

近年、水田転作作物としてダイズの栽培が奨励され、ダイズの作付面積が増加している。しかしながら、北陸地域では、しわ粒の多発等による種子の品質低下が大きな問題となっている。新潟県では、ダイズの1等級+2等級の割合が10%程度(平成13年度)と著しく低く、生産者のダイズ生産意欲を低下させている。

これまで高橋らは、緩効性窒素肥料の深層施肥(播種条直下20 cmの深さに被覆尿素10 kgN/10aを基肥施用)が、ダイズ生産に対して重要な窒素供給源である根粒による窒素固定^(4, 5)を阻害せず、かつ子実肥大期まで継続的に窒素を供給するため、ダイズの増収効果が得られることを明らかにしてきた⁽¹²⁻¹⁹⁾。高橋らは、ダイズ用深層施肥播種機を用い、基肥として慣行のダイズ化成肥料の全層施肥(硫安1.6 kgN/10aを含むダイズ化成を表土約10 cmに全層基肥施用)に加え、リニアタイプの被覆尿素(LP-100, 10 kgN/10a)を基肥として播種列直下約20 cmの深さに条施肥する新規施肥法を考案し、慣行区よりも一貫して多収が得られることを報告した⁽¹²⁻¹⁹⁾。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480 kg/10aに対し、深層施肥区では592 kg/10aと極めて高い収量が得られた。被覆尿素深層施肥区のダイズの生育は、R1期(開花始期)までは慣行区とあまり変わらないが、開花始期以降、乾物重、窒素集積量ともに深層施肥区における増加が顕著であった。R7期(成熟始期、黄葉期)における被覆尿素深層施肥区のダイズは葉面積指数が4.5と慣行区の2.9よりも高く、また、葉身クロロフィル含量も高かったため、生育後期まで光合成が維持されたと考えられる。収量構成要素の解析によると被覆尿素的深層施肥による増収は、100粒重の増加よりも主に莢数(節数と節当たり莢数)の増加に起因した。深層施肥区では、被覆尿素から溶出した尿素はアンモニアとして施肥部位近傍に集積しており、根粒が多く着生する地表部には無機態窒素の集積は認められなかった⁽¹⁵⁾。

その後、Tewariらは、被覆尿素的の代わりに、より安価な石灰窒素を用いることができるか否かを新潟県内の三ヶ所の圃場で調べた^(6, 9, 11)。2001年に、長岡市にある新潟県農業総合研究所の転換初年度水田転換畑⁽²¹⁾、道路工事残土を厚さ30 cm客土造成した直後のダイズ栽培低地圃場⁽²²⁾、新潟市五十嵐の砂丘地圃場⁽²³⁾において、石灰窒素と被覆尿素的の深層施肥効果を検討した。窒素肥料は、高橋らと同様に、10 kgN/10aを播種直下約20 cmの深さに施用した。試験では、比較のために尿素的の深層施肥区および深層施肥をおこなわ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。三圃場において肥料の効果を比べると、子実収量は、どの圃場でも

慣行区よりも尿素深層施肥区がまさり、さらに被覆尿素深層施肥区と石灰窒素深層施肥区で最高値を示した。

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は、肥料からの窒素供給だけでなく、根粒からの固定窒素および土壌由来窒素の影響が考えられる。これらの窒素の利用について解析するため、安定同位体の ^{15}N で標識した肥料を用いて、施肥処理ごとの、窒素固定由来窒素、土壌由来窒素、施肥由来窒素の分析を行った⁽²⁶⁾。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行った。肥料は、 ^{15}N 標識の硫安、尿素、被覆尿素、または石灰窒素を地表下20 cmに施用し、ダイズ品種「エンレイ」とエンレイから作出された根粒非着生系統のEn1282を同じ畦に交互に植えた。成熟始期(R7)に植物を採取し、エンレイとEn1282の部位ごとの ^{15}N 濃度と窒素量を測定した。「エンレイ」における固定窒素由来窒素量、土壌窒素由来窒素量、肥料窒素由来窒素量を ^{15}N 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最も促進され、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」の子実収量は、石灰窒素の深層施肥で最も高く(650 g/m²)、ついで被覆尿素区(561 g/m²)、尿素区(418 g/m²)、硫安区(329 g/m²)、慣行区(231 g/m²)の順であった。 ^{15}N 濃度から計算した肥料の利用率は、石灰窒素(43%)と被覆尿素(36%)で尿素(21%)と硫安(8.5%)より高かった。

ここで、石灰窒素深層施肥区と被覆尿素深層施肥区において、株あたりの肥料由来の窒素量は、4.3 g、3.6 gで尿素区(2.1 g)、硫安区(0.85 g)より高いが、ダイズが同化した全窒素量の約10%程度であった。すなわち、石灰窒素と被覆尿素的深層施肥が、窒素固定を促進していた。 ^{15}N 希釈法で求めた1 m²当たりの窒素固定由来窒素量は、石灰窒素区(32 g)と被覆尿素区(25 g)で、尿素区(21 g)、硫安区(20 g)より高かった。

これらの結果から、石灰窒素と被覆尿素的深層施肥は、生育後期まで深層部から硝酸やアンモニア等の肥料由来窒素を効率的に供給するだけでなく、葉の光合成活性を生育後半まで高く保ち、根粒の窒素固定や根による土壌由来窒素の吸収を促進することによって総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。

緩効性窒素肥料の深層施肥法は、ダイズの生育期間全般にわたり窒素栄養を供給することから、ダイズの収量増加のみならず、しわ粒発生を低下させ品質を改善できる可能性がある。そこで、本研究では、被覆尿素や石灰窒素の深層施肥がしわ粒発生の低下にどのような影響を与えるかを調べた。さらに、肥料窒素の吸収、土壌窒素の利用、窒素固定活性との関連から解析し、しわ粒発生低減のための技術開発の基礎的知見を得ることを主な目的とした。本研究は、新潟県農業総合研究所(長岡市)の水田転換畑(転換後1作目)において試験を行った。石灰窒素の施肥深度による影響を実験1で、石灰窒素の施肥量による影響を実験2で、石灰窒素と被覆尿素的比較を実験3で行った。

2) 材料と方法

(1) 栽培方法

a) 実験1: 石灰窒素の施肥深度が子実の収量、品質、窒素吸収等に及ぼす影響

ダイズの栽培は、2003年に新潟県農業総合研究所(長岡)の水田転換畑で行った。基肥は、N(1.6 kgN/10a)、P(6 kgP₂O₅/10a)、K(8 kgK₂O/10a)を含むダイズ用化成肥料および消石灰(100 kgCa(OH)₂/10a)を表面施用し、ロータリー耕うんで表土約10 cmまでに全層施用した。処理区は、対照区(ダ

イズ化成基肥のみで深層施肥は行わない), D10区(ダイズ化成基肥に加え, 石灰窒素(10 kgN/10a)を播種直下深さ10 cmに埋め込む:Depth 10 cm), D15区(ダイズ化成基肥に加え, 石灰窒素を播種直下深さ15 cmに埋め込む), D20区(ダイズ化成基肥に加え, 石灰窒素を播種直下深さ20 cmに埋め込む)を設けた。施肥は, 播種位置にスコップで穴を掘り, 肥料を埋設した。実験には, 新潟県のダイズ主要品種である「エンレイ」を用い, 播種密度は8.9株/m²(畝間75 cm, 株間15 cm, 1本立)で栽培した。処理区は, 1区3 m²(1.5 m×2 m), 3反復で実施した。一部に¹⁵N標識の石灰窒素(窒素濃度20.6%, ¹⁵N濃度10.9 atom%)を与える区を設けた。ダイズ種子は, 70%エタノールに1分浸漬し, 水洗後, 0.5%次亜塩素酸ナトリウム水溶液中で5分間滅菌し, よく水洗した。その後, ダイズ根粒菌(*Bradyrhizobium japonicum*, USDA110株)懸濁液に10分間浸漬し, 種子接種を行った。生育時期別に導管液と植物体試料を採取し, 石灰窒素の施肥深度が, ダイズの生育, 窒素同化, および子実の収量と品質に及ぼす効果を調べた。

b) 実験2: 石灰窒素の施肥量が子実の収量, 品質, 窒素吸収等に及ぼす影響

栽培は, 2003年に新潟県農業総合研究所(長岡)の水田転換畑で行った。基肥, 播種密度, 根粒菌接種方法も同様である。処理区は, 対照区(ダイズ化成基肥のみで深層施肥は行わない), A5区(ダイズ化成基肥に加え, 石灰窒素5 kgN/10aを播種直下深さ20 cmに埋め込む: Amount 5 kgN/10a), A10区(ダイズ化成基肥に加え, 石灰窒素10 kgN/10aを播種直下深さ20 cmに埋め込む), A20区(ダイズ化成基肥に加え, 石灰窒素20 kgN/10aを播種直下深さ20 cmに埋め込む)を設けた。一部に¹⁵N標識の石灰窒素(窒素濃度20.6%, ¹⁵N濃度10.9 atom%)を与える区を設けた。生育時期別に試料を採取し, 石灰窒素の施肥量が, ダイズの生育, 窒素同化, および子実の収量と品質に及ぼす効果を調べた。

c) 実験3: 深層施肥した石灰窒素と被覆尿素の時期別吸収とダイズの生育, 収量, 窒素固定, 窒素吸収, 品質への影響

栽培試験は, 2005年に新潟県農業総合研究所(長岡)の水田転換畑で行った。基肥は, N(1.6 kgN/10a), P(6 kgP₂O₅/10a), K(8 kgK₂O/10a)を含むダイズ用化成肥料および, 消石灰(100 kgCa(OH)₂/10a)を表土約10 cmまでに全層施用した。処理区は, 対照区(ダイズ化成基肥のみで深層施肥は行わない), CU区(ダイズ化成基肥に加え, 100日タイプの被覆尿素LP-100(10 kgN/10a)を播種直下深さ20 cmに埋め込む), LN区(ダイズ化成基肥に加え, 石灰窒素(10 kgN/10a)を播種直下深さ20 cmに埋め込む)を設けた。実験には, ダイズ品種「エンレイ」を用い, 播種密度は8.9株 m²(畝間75 cm, 株間15 cm, 1本立)で栽培した。栽培区の一部に¹⁵N標識の被覆尿素(窒素濃度40%, ¹⁵N濃度3.22 atom%)または, 石灰窒素(窒素濃度20.6%, ¹⁵N濃度10.8 atom%)を与える区(施肥量10 kgN/10a)を設けた。開花期以降, サンプルングを行い, 石灰窒素と被覆尿素の時期別吸収量, 生育, 窒素固定と窒素吸収に与える影響, および子実収量と外観的品質に及ぼす影響を調べた。

(2) 栽培中の植物の採取と分析

実験1と実験2では, 播種71日後(R2期: 開花盛), 102日後(R5期: 子実肥大始), 130日後に(R7期: 成熟始)に株の根元(地上部から約3 cmの位置)を剪定はさみで切断し, 地上部を採取するとともに, 切り株の表皮を剥ぎ, 木部にシリコン管をかぶせ切り株から溢泌する導管液を約30分間採取した。また, 導管液採取後根を掘り起こして採取した。導管液中のウレイド態窒素濃度, 硝酸態窒素濃度, アミド態窒素濃度を分光法で測定し, 単純相対ウレイド法で, 根粒による窒素固定依存率と根からの吸収窒素依存率を推定した^(2, 3)。植物体は, R2とR5期には地上部と根, R7期には, 葉+莖, 莢+子実, 根に分けて通風乾燥し, 乾物重を測定した。乾燥試料は, 微粉末に粉砕し,

ケルダール分解で窒素濃度を測定した。播種 143 日後の成熟期 (R8 期) に各区から 10 株を採取し、子実の収量および品質を調べた。

実験 3 では、播種 61 日後 (R1 期: 開花始), 81 日後 (R3 期: 着莢始) 102 日後 (R5 期: 子実肥大始), 130 日後に (R7 期: 成熟始) に株の根元 (地上部から約 3 cm の位置) を剪定はさみで切断し、地上部を採取するとともに、切り株の表皮を剥ぎ、木部にシリコン管をかぶせ、切り株から溢泌する導管液を約 30 分間採取した。また、導管液採取後根を掘り起こして採取した。導管液中のウレイド態窒素濃度、硝酸態窒素濃度、アミド態窒素濃度を測定し、単純相対ウレイド法で、根粒による窒素固定依存率と根からの吸収窒素依存率を推定した^(2, 3)。植物体は、R1 期、R3 期と R5 期には地上部と根、R7 期には、葉+莖、莢+子実、根に分けて通風乾燥し、乾物重を測定した。乾燥試料を微粉末に粉碎し、ケルダール分解で窒素濃度を測定した。成熟期 (R8 期) に各区から 10 株を採取し、1 株ごとに子実の収量および品質を調べた。

(3) ¹⁵N 標識石灰窒素施用植物の採取と分析

実験 1 と実験 2 では、播種 134 日後 (R7 期) に、¹⁵N 標識石灰窒素を施用した植物を採取した。植物は、葉+莖、莢+子実、根に分けて通風乾燥し、乾物重を測定した。乾燥試料を微粉末に粉碎し、ケルダール分解で窒素濃度を測定した。ケルダール分解液は、窒素量が 1~2 μg になるように分解液約 10~50 μL を片方を閉じた外径 4 mm のパイレックスガラス管に入れ、減圧脱水後、放電管を作成し、発光分光法 (日本分光, JASCO N-150) で ¹⁵N 濃度を測定した⁽⁶⁾。実験 3 では、播種 61 日後 (R1 期: 開花始), 81 日後 (R3 期: 着莢始), 102 日後 (R5 期: 子実肥大始), 130 日後 (R7 期: 成熟始) に、¹⁵N 施肥枠内から試料 (地上部および根) を採取した。

(4) 子実の収量と品質の調査

収穫は、実験 1 と実験 2 では播種 143 日後に行った。各区から生育中庸の株を 10 株収穫し、1 株ごとに新聞紙で包み、ガラス室内で 2-4 週間乾燥させた。莢数を測定した後、子実を食糧庁計画流通部消費改善課の分類基準を参考に品質ごとに分別し、子実数、子実重を測定した。本報告では、整粒、小粒、亀甲じわ粒、ちりめんじわ粒、その他に分類して表示した。その他には、病害粒 (紫斑病、褐斑病)、虫害粒 (食虫害、吸虫害)、裂皮粒、汚損粒、変質粒、未熟粒、枯死粒を含む。実験 1 および実験 2 では、亀甲じわとちりめんじわを併発しているものは、亀甲じわとした。実験 3 では、亀甲じわとちりめんじわを併発しているものは別途計測した。

3) 結果

(1) ダイズ子実収量および品質に及ぼす石灰窒素の施肥位置の影響

長岡の水田転換畑において、石灰窒素 (10 kgN/10a) を、播種位置直下、深さ 10 cm, 15 cm, または 20 cm の位置に施肥した。無施用の対照区を併せて設けた試験区の株あたり乾物重の生育時期別変化を図 3-2-1 に示す。どの時期においても、石灰窒素の施肥深度が深い程、全乾物重が高くなる傾向が見られた。特に、深さ 20 cm に石灰窒素を埋設した区がどの時期にも最高値を示した。

表 3-2-1 に、石灰窒素の深度別の R7 期 (成熟始期, 黄葉期) におけるダイズの生育状況を示す。株当たり子実重と子実数は、D10 区と D15 区で対照区より高まったが、D10 区と D15 区の間では差がなかった。D20 区では、子実数、子実重ともに最高値を示した。莢数、主莖節数、100 粒重も同様の傾向を示した。主莖長は対照区で約 29.8 cm と短かったが、D10 区、D15 区、D20 区で、43.8 cm, 49.1 cm, 51.0 cm と施肥深度が深い程、主莖伸長促進効果が高かった。

図 3-2-2 に R7 期における株当たり窒素含有量を示す。全窒素含有量は、D20 区で最も高かった。

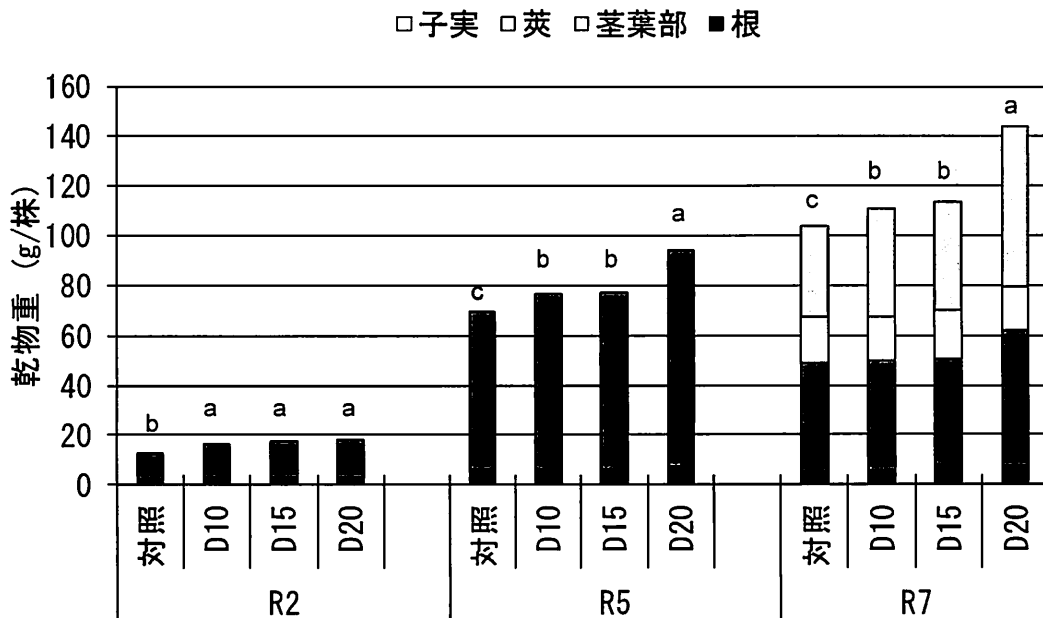


図 3-2-1 石灰窒素 (10 kgN/10a) の深度別施肥区の生育時期別乾物重の推移

処理区：対照；深層施肥なし．D10；深さ 10 cm に施肥．D15；深さ 15 cm に施肥．D20；深さ 20 cm に施肥．生育時期：R2；開花盛．R5；子実肥大始．R7；成熟始．
 図棒グラフの上のアルファベットが異なる場合は< 5%の有意差があることを示す．

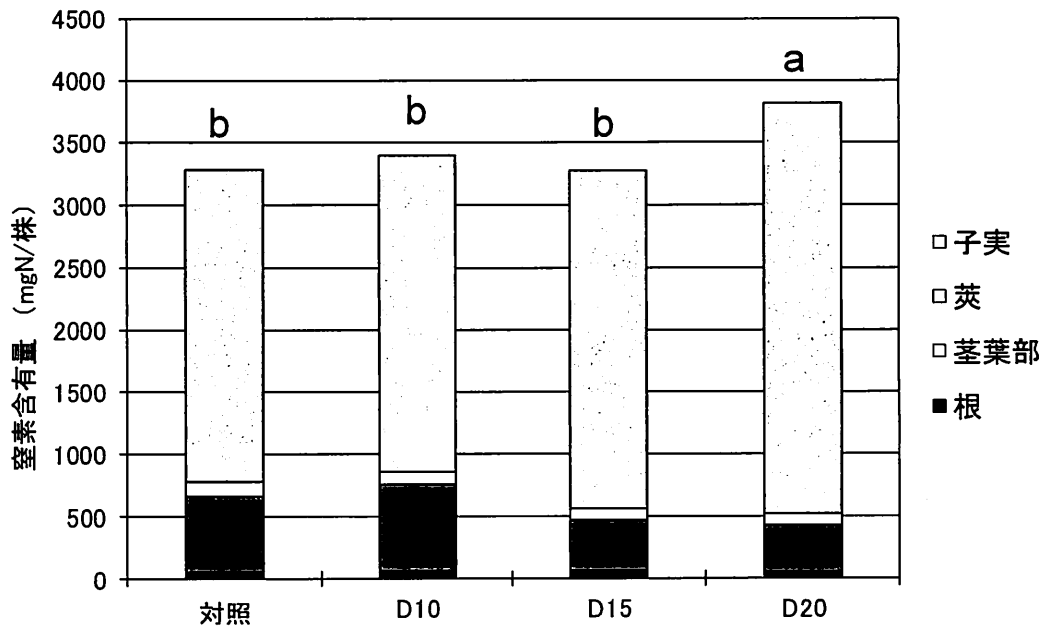


図 3-2-2 R7 期 (成熟始) における石灰窒素 (10 kgN/10a) の深度別施肥区における株あたり窒素含有量

処理区：対照；深層施肥なし．D10；深さ 10 cm に施肥．D15；深さ 15 cm に施肥．D20；深さ 20 cm に施肥．図棒グラフの上のアルファベットが異なる場合は< 5%の有意差があることを示す

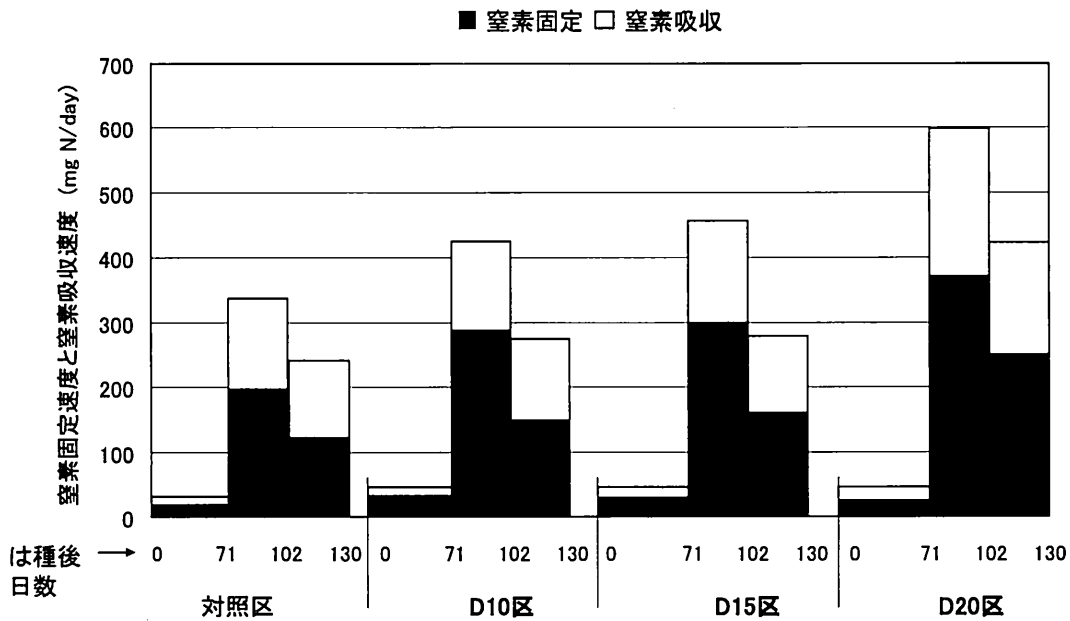


図 3-2-3 石灰窒素 (10 kgN/10a) の深度別施肥区の生育時期別窒素固定活性と窒素吸収速度の推移

処理区：対照；深層施肥なし．D10；深さ 10 cm に施肥．D15；深さ 15 cm に施肥．D20；深さ 20 cm に施肥．
生育時期：R2；(播種 71 日後) 開花盛，R5；(播種 102 日後) 子実肥大始，R7；(播種 130 日後) 成熟始．

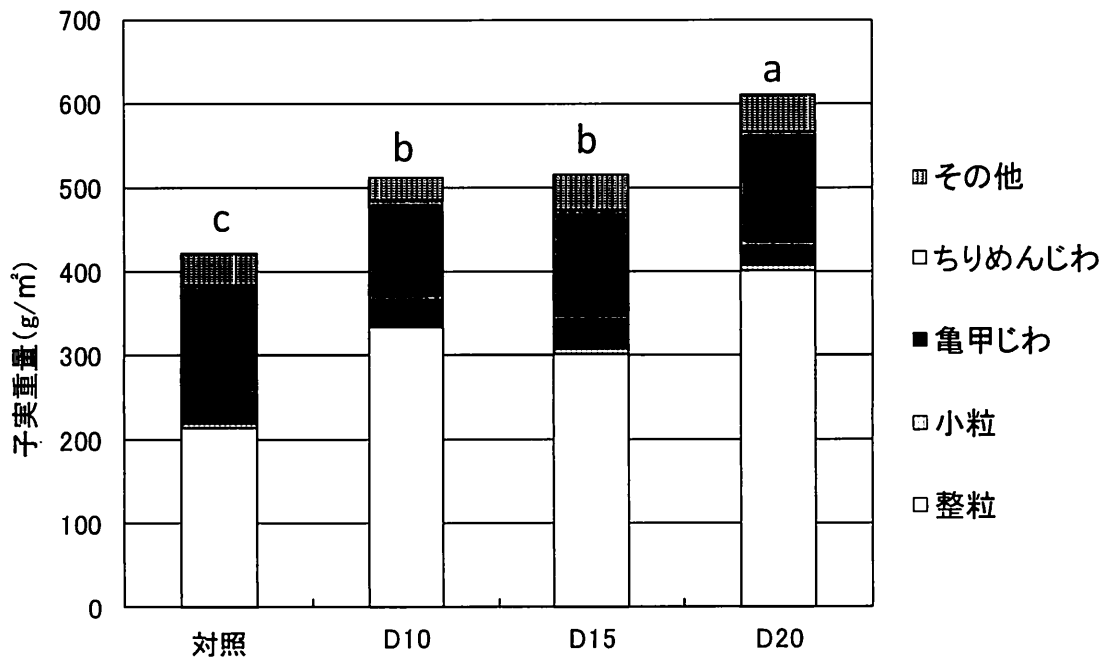


図 3-2-4 R8 期 (収穫期) における石灰窒素 (10 kgN/10a) の深度別施肥区の子実収量と品質

処理区：対照；深層施肥なし．D10；深さ 10 cm に施肥．D15；深さ 15 cm に施肥．D20；深さ 20 cm に施肥．
図棒グラフの上のアルファベットが異なる場合は < 5% の有意差があることを示す．

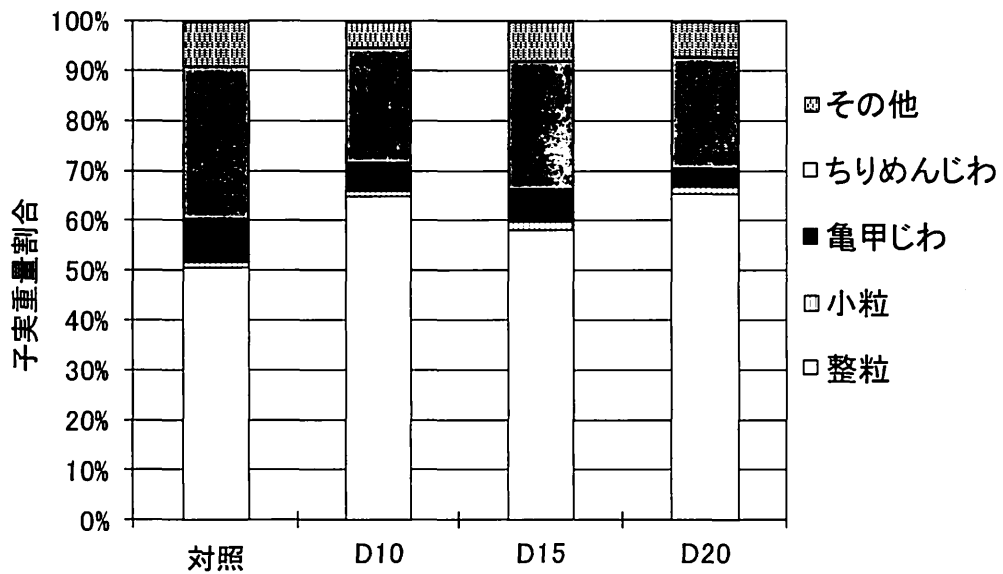


図 3-2-5 R8 期 (収穫期) における石灰窒素 (10 kgN/10a) の深度別施肥区の子実品質割合

処理区: 対照; 深層施肥なし. D10; 深さ 10 cm に施肥. D15; 深さ 15 cm に施肥.
D20; 深さ 20 cm に施肥.

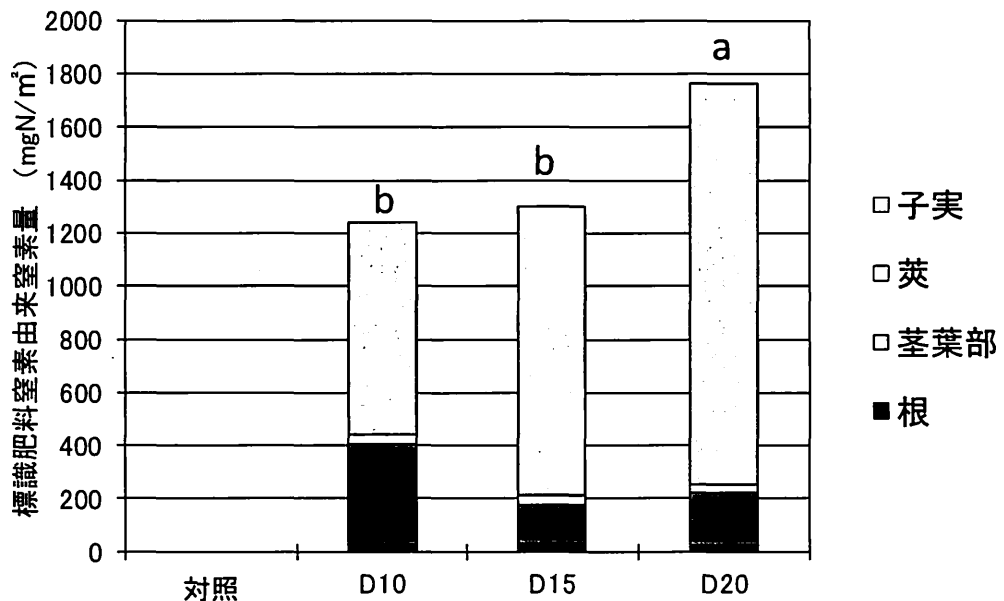


図 3-2-6 石灰窒素 (10 kgN/10a) の深度別施肥区の部位別石灰窒素由来窒素量

処理区: 対照; 深層施肥なし. D10; 深さ 10 cm に施肥. D15; 深さ 15 cm に施肥.
D20; 深さ 20 cm に施肥.

図棒グラフの上のアルファベットが異なる場合は< 5%の有意差があることを示す

表 3-2-1 石灰窒素の施肥深度による黄葉期ダイズの生育に及ぼす影響

	子実重 g/株	子実数 個/株	100粒重 g	莢数 個/株	主莖長 cm	主莖節数 個/株	莖径 mm
対照	36.0	139	25.6	78	29.8	8.3	10.7
D10	43.5	154	28.2	78	43.8	10.3	10.3
D15	43.7	157	27.9	74	49.1	10.7	9.0
D20	64.7	213	29.5	96	51.0	11.7	10.8

対照：深層施肥なし。D10：深さ 10 cm に施肥。D15：深さ 15 cm に施肥。D20：深さ 20 cm に施肥。
(施肥量：10 kgN/10a, 播種密度 8.9 株/m²)

表 3-2-2 施肥深度による黄葉期におけるダイズの窒素固定、土壌、肥料由来窒素量の比較

処理区	窒素量 (gN/m ²)			
	固定窒素	土壌窒素	肥料窒素	全窒素
対照	10.6	8.5	0	19.1
D10	15.1	7.3	1.2	23.6
D15	15.5	7.9	1.3	24.7
D20	20.4	11.4	1.8	33.6

対照：深層施肥なし。D10：深さ 10 cm に施肥。D15：深さ 15 cm に施肥。D20：深さ 20 cm に施肥。
(施肥量：10 kgN/10a, 播種密度 8.9 株/m²)

対照区と D10 区では莖葉部の窒素含有量が D15 区、D20 区より多く含まれたが、子実の窒素含有量は低かった。相対ウレイド法から推定した生育時期別一日あたり窒素固定活性と窒素吸収速度を図 3-2-3 に示す。D10 区では、窒素吸収速度は対照区と同様であったが、窒素固定活性が若干上昇した。D15 区では、窒素固定活性と、71 日から 102 日までの窒素吸収速度の増加が認められた。D20 区では、窒素固定活性も、窒素吸収速度も対照区に比べて顕著に増加した。

成熟期 (R8 期) に収穫したダイズの子実重量は、対照区、D10 区、D15 区、D20 区で、それぞれ、428 g/m²、507 g/m²、525 g/m²、614 g/m² となり、深さ 20 cm に施肥した区の収量が最高であった (図 3-2-4)。また、整粒重量も、対照区、D10 区、D15 区、D20 区で、それぞれ、214 g/m²、329 g/m²、294 g/m²、401 g/m² となり、深さ 20 cm に施肥した区の収量が最高であった (図 3-2-4)。収穫時の子実の整粒割合は、石灰窒素の施肥で 10-15% 高くなり、D20 区で最高値を示した (図 3-2-5)。整粒割合の増加は、亀甲じわ、ちりめんじわ粒の割合がともに低下したことによる。

¹⁵N 標識石灰窒素の利用量は、10 cm 区、15 cm 区、20 cm 区で、それぞれ、1240 mgN/m²、1310 mgN/m²、1760 mgN/m² となり、D10 区と D15 区はほぼ同程度であったが、D20 区では高い値を示した (図 3-2-6)。標識窒素分配率をみると、15 cm 区、20 cm 区では 80% 以上が子実に分配されていたが、10 cm 区では子実分配率は 65% 程度で莖葉部の割合が高かった。

表 3-2-2 に相対ウレイド値と ¹⁵N 分析値から求めた施肥深度別の窒素固定由来窒素、土壌由来窒素、肥料由来窒素の値を示す。窒素固定由来窒素については、対照区 10.6 gN/m² に対して、D10 区 15.1 gN/m²、D15 区 15.5 gN/m²、D20 区 20.4 gN/m² となり、深さ 20 cm に施肥した区では対照区の 2 倍にも達した。土壌由来窒素は、慣行区、D10 区、D15 区で差がなかったが、D20 区では高まった。肥料由来窒素も、D20 区で最高値を示した。全窒素含有量は、20 cm に施肥した区で 33.6 gN/m² となり、慣行区、D10 区、D15 区の 19.1 gN/m²、23.6 gN/m²、24.7 gN/m² を大きく上回った。

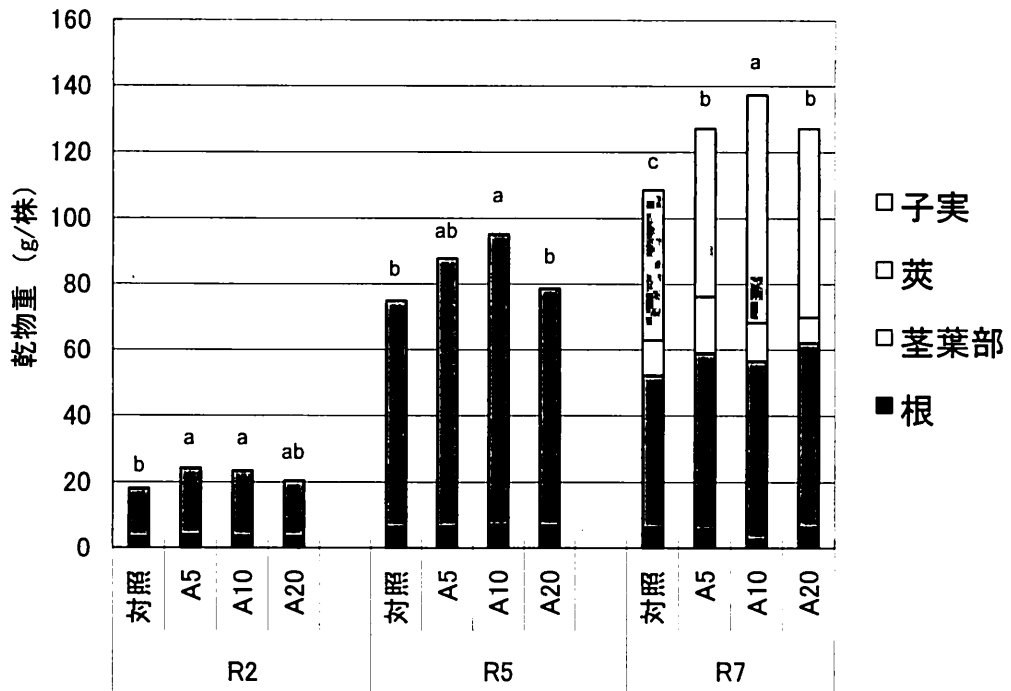


図 3-2-7 石灰窒素深層施肥（深さ 20 cm）の施用量別施肥区における生育時期別乾物重の推移

処理区：対照；深層施肥なし．A5；施用量 5 kgN/10a．A10；施肥量 10 kgN/10a．

A20；施肥量 20 kgN/10a．

生育時期：R2；開花盛．R5；子実肥大始．R7；成熟始．

図棒グラフの上のアルファベットが異なる場合は< 5%の有意差があることを示す．

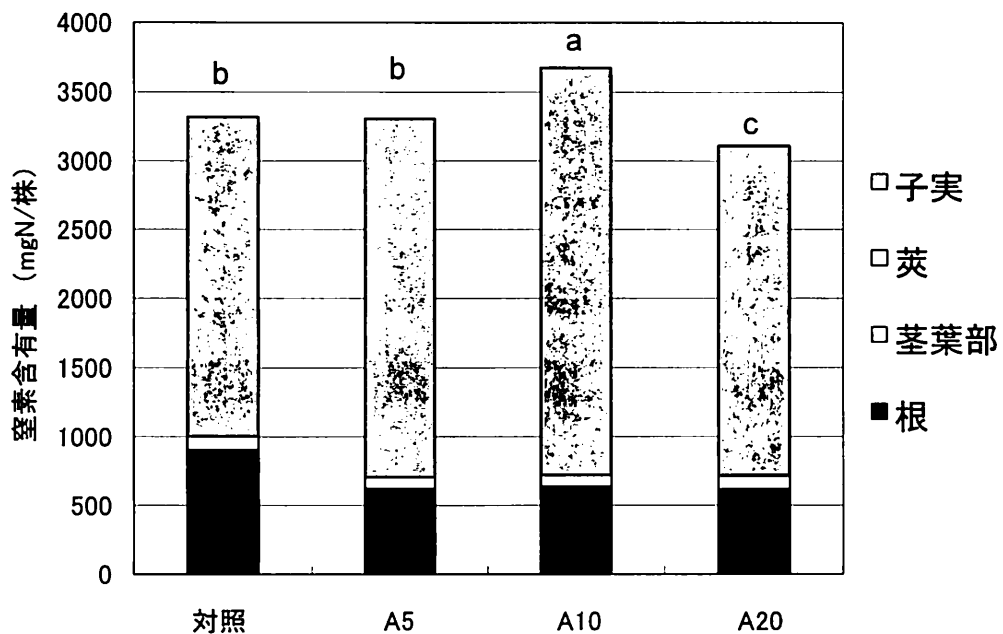


図 3-2-8 R7 期（成熟始）における石灰窒素深層施肥（深さ 20 cm）の施用量別施肥区における株あたり窒素含有量

処理区：対照；深層施肥なし．A5；施用量 5 kgN/10a．A10；施用量 10 kgN/10a．

A20；施用量 20 kgN/10a．

図棒グラフの上のアルファベットが異なる場合は< 5%の有意差があることを示す．

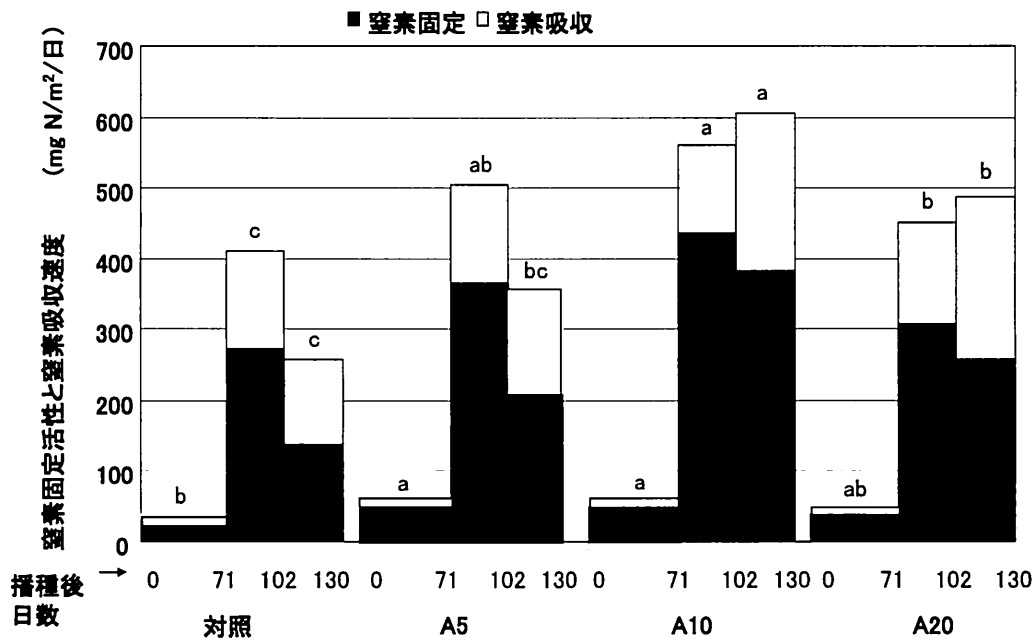


図 3-2-9 石灰窒素（深さ 20 cm）の施用量別施肥区の生育時期別窒素固定活性と窒素吸収速度の推移

処理区：対照；深層施肥なし．A5；施用量 5 kgN/10a. A10；施用量 10 kgN/10a. A20；施用量 20 kgN/10a.
 生育時期：R2；（播種 71 日後）開花盛，R5；（播種 102 日後）子実肥大始，R7；（播種 130 日後）成熟始。
 図棒グラフの上のアルファベットが異なる場合は<5%の有意差があることを示す。

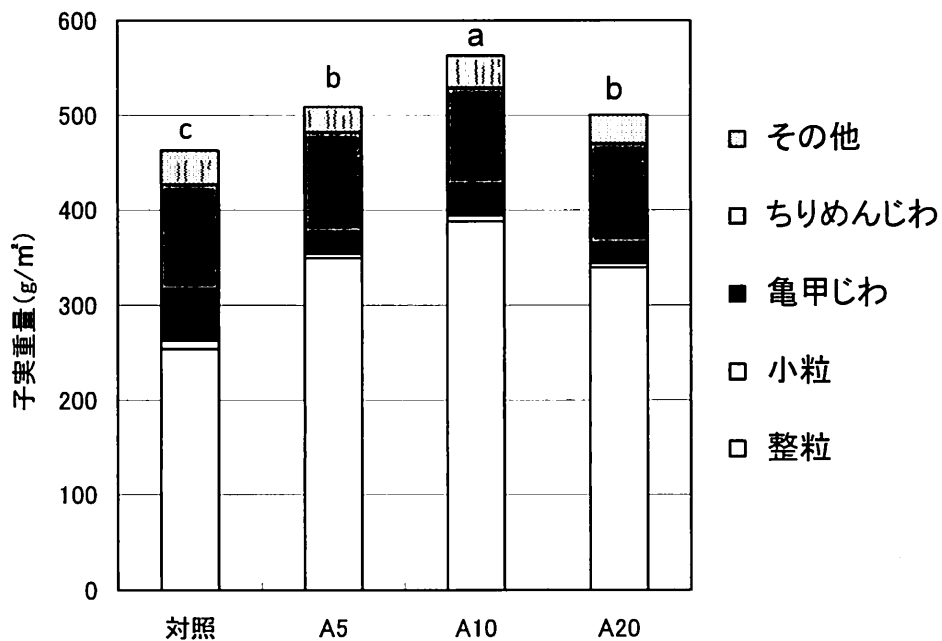


図 3-2-10 R8 期（収穫期）における，石灰窒素深層施肥（深さ 20 cm）の施用量別施肥区における子実収量と品質

処理区：対照；深層施肥なし．A5；施用量 5 kgN/10a. A10；施用量 10 kgN/10a.
 A20；施用量 20 kgN/10a.
 図棒グラフの上のアルファベットが異なる場合は<5%の有意差があることを示す。

(2) ダイズ子実収量および品質に及ぼす石灰窒素の施肥量の影響

長岡の水田転換畑において、播種時に石灰窒素 (5 kgN/10a, 10 kgN/10a, 20 kgN/10a) を、播種条直下、深さ 20 cm の位置に深層施肥した。あわせて深層施肥を行わない対照区 (0 kgN/10a) を設けた。図 3-2-7 に生育時期別乾物重の推移を示す。R2 期においては、全乾物重は、対照区が最も低く A5 区が最高値を示した。R5 期と R7 期においては、対照区が最も低く A10 区が最高値を示した。A20 区では多量の施肥をしたにもかかわらず、どの時期にも A10 区より全乾物重は低かった。表 3-2-3 に石灰窒素施肥量別の R7 期におけるダイズの生育状況を示す。株当たり子実重と子実数は、A10 区で対照区より著しく高まったが、A20 区ではむしろ A10 区よりも低下した。100 粒重、莢数、主茎長も同様の傾向を示した。ただし、主茎節数は、A20 区が最高値を示した。

図 3-2-8 に R7 期における処理区別窒素含有量を示す。全窒素含有量は、A10 区で最も高く、A20 区が最低であった。また、対照区では茎葉部への窒素の分配が多く、石灰窒素深層施肥では子実への分配が多かった。

相対ウレイド法から推定した生育時期別の日あたり窒素固定活性と窒素吸収速度を図 3-2-9 に示す。深さ 20 cm に施肥した場合は、いずれの区でも、対照区より窒素固定と窒素吸収の促進が認められた。A5 区では、R2 期から R5 期の間に比べて、R5 期 (102 日) 以降、窒素固定活性と窒素吸収速度の低下が見られたが、A10 区と A20 区では、R5 期から R7 期の間も R2 期から R5 期とほぼ同等の窒素固定活性を維持し、かつ高い窒素吸収速度を示した。

図 3-2-10 に示すように、子実収量は、対照区、A5 区、A10 区、A20 区で、それぞれ、485 g/m²、530 g/m²、585 g/m²、515 g/m² となり、10 kgN/10a 区で最高収量が得られた。種子品質割合については、石灰窒素の深層施肥でいずれの施肥量でも、整粒割合が対照区の 52% から 67% 前後に増加し、亀甲じわが半減し、ちりめんじわの割合も低下した (図 3-2-11)。

¹⁵N 標識石灰窒素の利用量は、A5 区、A10 区、A20 区で、それぞれ、345 mgN/m²、710 mgN/m²、1000 mgN/m² となり、A10 区では、A5 区のほぼ 2 倍の吸収量であったが、A20 区では A10 区より吸収量は増加したものの、1.4 倍に留まった (図 3-2-12)。標識窒素分配率をみると、A10 区と A20 区では標識窒素の約 75% が子実に分配されていたが、A5 区では子実分配率は 60% 程度で茎葉部の割合が高かった。

表 3-2-4 に R7 期における施肥深度別の窒素固定由来窒素、土壌由来窒素、肥料由来窒素の値を示す。窒素固定由来窒素については、対照区 14.4 gN/m² に対して、A5 区 20.1 gN/m²、A10 区 27.7 gN/m²、A20 区 19.4 gN/m² となり、10 kgN/10a に施肥した区で最高値を示した。土壌由来窒素は、慣行区 < A5 区 < A10 区 < A20 区であった。肥料由来窒素も同様であった。全窒素含有量は、A10 区で 38.5 gN/m² となり、対照区、A5 区、A20 区の 22.7 gN/m²、29.4 gN/m²、31.1 gN/m² を大きく上回った。

(3) 実験 3：深層施肥した石灰窒素と被覆尿素の時期別吸収と窒素固定、生育、収量、品質への影響

開花始期以降の株当たり乾物重の生育時期別変化を図 3-2-13 に示す。R3 期までは、対照区と被覆尿素及び石灰窒素の深層施肥区の生育に有意差が認められなかったが、R5 期と R7 期では、被覆尿素及び石灰窒素の深層施肥区で対照区より有意に高い乾物集積が認められた。図 3-2-14 に R7 期における根、茎葉部、莢、子実、各部位の株あたり乾物重を示す。被覆尿素または石灰窒素の深層施肥で、茎葉部と子実の乾物重が有意に増加したが、根と莢は増加が認められなかった。開花始期以降の株当たり全窒素含有量の生育時期別変化を図 3-2-15 に示す。被覆尿素と石灰窒素の深層施肥区的全窒素含有量は、開花始 (R1 期) から対照区より高く、最後まで高く推移した。R5 期以降、石灰窒素区が被覆尿素区を若干上回った。表 3-2-5 に被覆尿素と石灰窒素の深層施肥によるダイズの収量構成

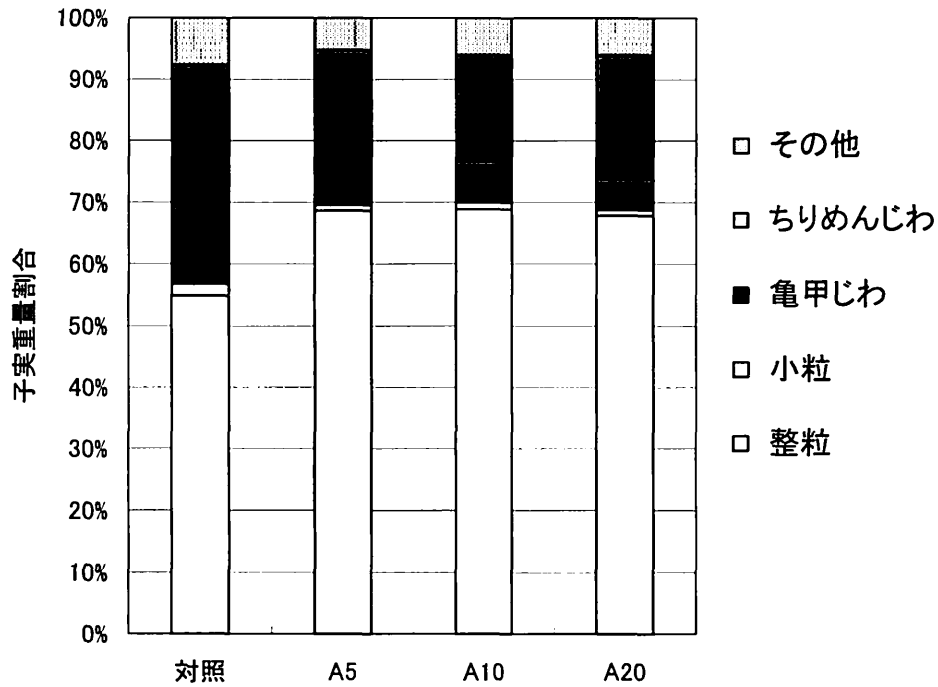


図 3-2-11 R8 期 (収穫期) における石灰窒素深層施肥 (深さ 20 cm) の施用量別施肥区における子実品質割合

処理区: 対照; 深層施肥なし. A5; 施用量 5 kgN/10a.
A10; 施用量 10 kgN/10a. A20; 施用量 20 kgN/10a.

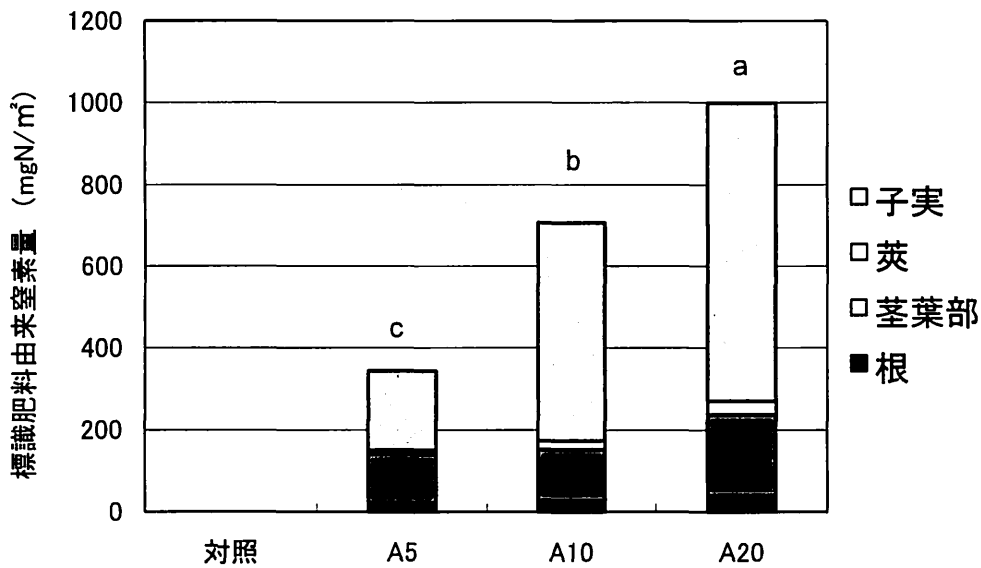


図 3-2-12 石灰窒素深層施肥 (深さ 20 cm) の施用量別施肥区における部位別石灰窒素由来窒素量

処理区: 対照; 深層施肥なし. A5; 施用量 5 kgN/10a.
A10; 施用量 10 kgN/10a. A20; 施用量 20 kgN/10a.

図棒グラフの上のアルファベットが異なる場合は < 5% の有意差があることを示す。

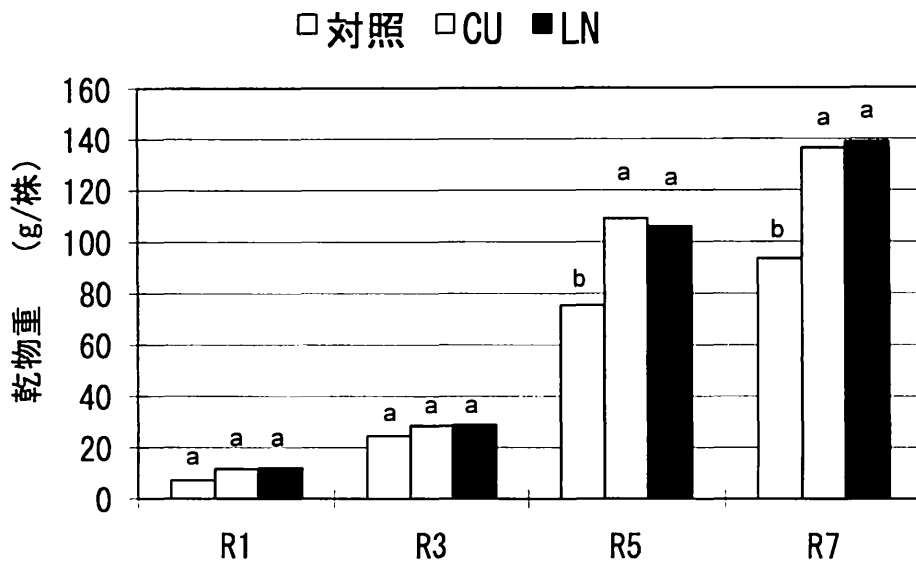


図 3-2-13 石灰窒素または被覆尿素の深層施肥（深さ 20 cm）区および対照区における生育時期別乾物重の推移

処理区：対照；深層施肥なし．CU；被覆尿素（施用量 10 kgN/10a）．

LN；石灰窒素（施用量 10 kgN/10a）．

図棒グラフの上のアルファベットが異なる場合は< 5%の有意差があることを示す．
生育時期：R1；開花始．R3；着莢始．R5；子実肥大始．R7；成熟始．

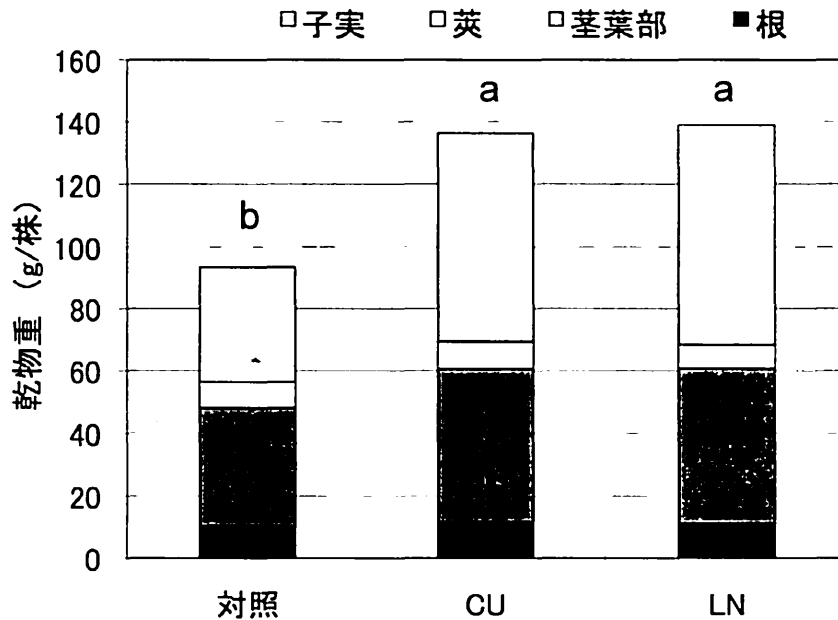


図 3-2-14 R7 期（成熟始）における石灰窒素または被覆尿素の深層施肥（深さ 20 cm）区および対照区の部位別乾物重

処理区：対照；深層施肥なし．CU；被覆尿素（施用量 10 kgN/10a）

LN；石灰窒素（施用量 10 kgN/10a）．

図棒グラフの上のアルファベットが異なる場合は< 5%の有意差があることを示す．

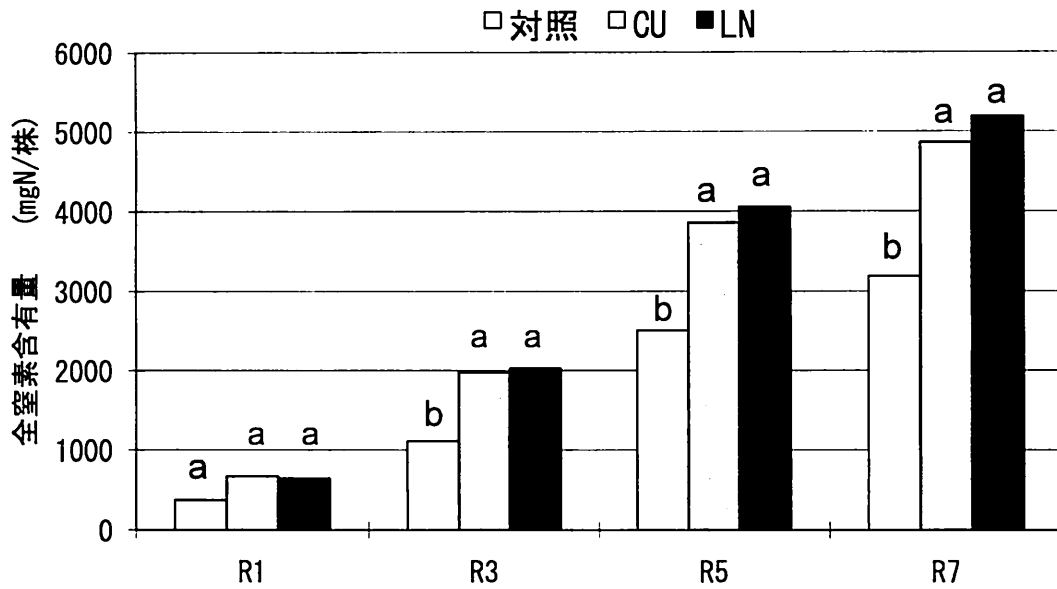


図 3-2-15 石灰窒素または被覆尿素の深層施肥（深さ 20 cm）区および対照区における生育時期別全窒素含有量の推移

処理区：対照；深層施肥なし。CU；被覆尿素（施用量 10 kgN/10a）

LN；石灰窒素（施用量 100 kgN/10a）。

生育時期：R1；開花始。R3；着莢始。R5；子実肥大始。R7；成熟始。

図棒グラフの上のアルファベットが異なる場合は< 5%の有意差があることを示す。

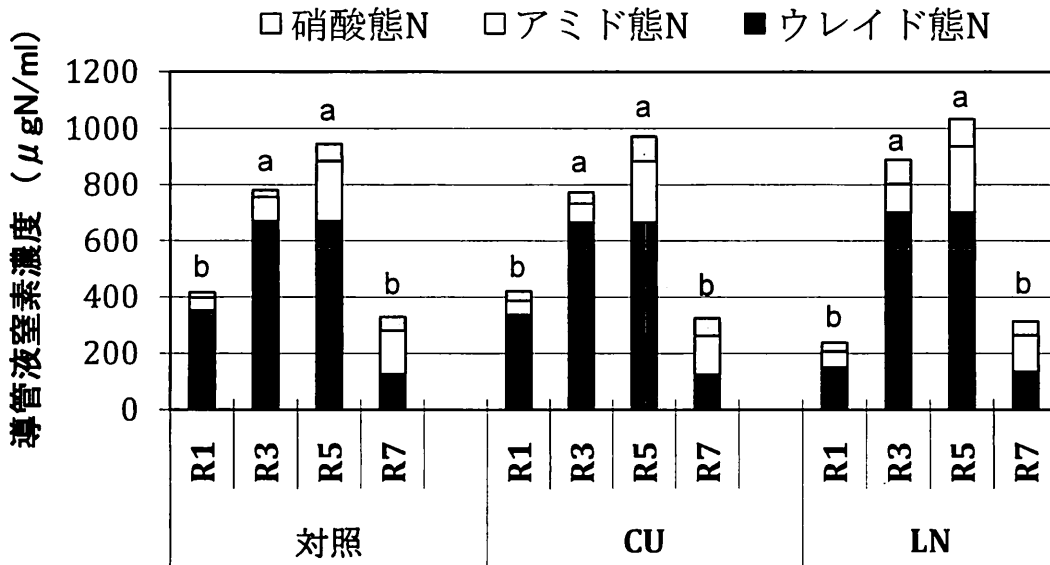


図 3-2-16 石灰窒素または被覆尿素の深層施肥（深さ 20 cm）区および対照区における生育時期別導管液窒素成分濃度の推移

処理区：対照；深層施肥なし。CU；被覆尿素（施用量 10 kgN/10a）

LN；石灰窒素（施用量 10 kgN/10a）。

図棒グラフの上のアルファベットが異なる場合は< 5%の有意差があることを示す。

生育時期：R1；開花始。R3；着莢始。R5；子実肥大始。R7；成熟始。

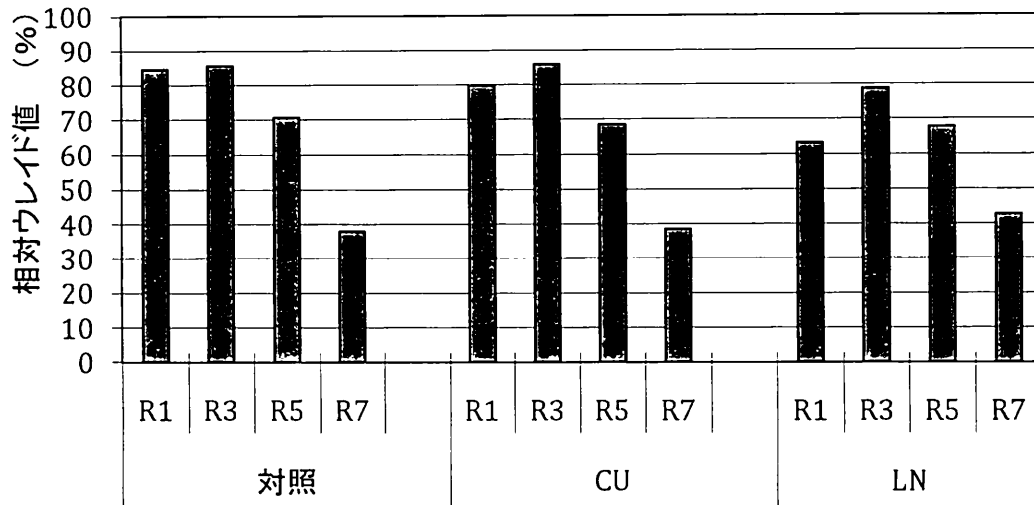


図 3-2-17 石灰窒素または被覆尿素の深層施肥（深さ 20 cm）区および対照区における生育時期別相対ウレイド値の推移

処理区：対照；深層施肥なし。CU；被覆尿素（施用量 10 kgN/10a）LN；石灰窒素（施用量 10 kgN/10a）。
生育時期：R1；開花始。R3；着莢始。R5；子実肥大始。R7；成熟始。

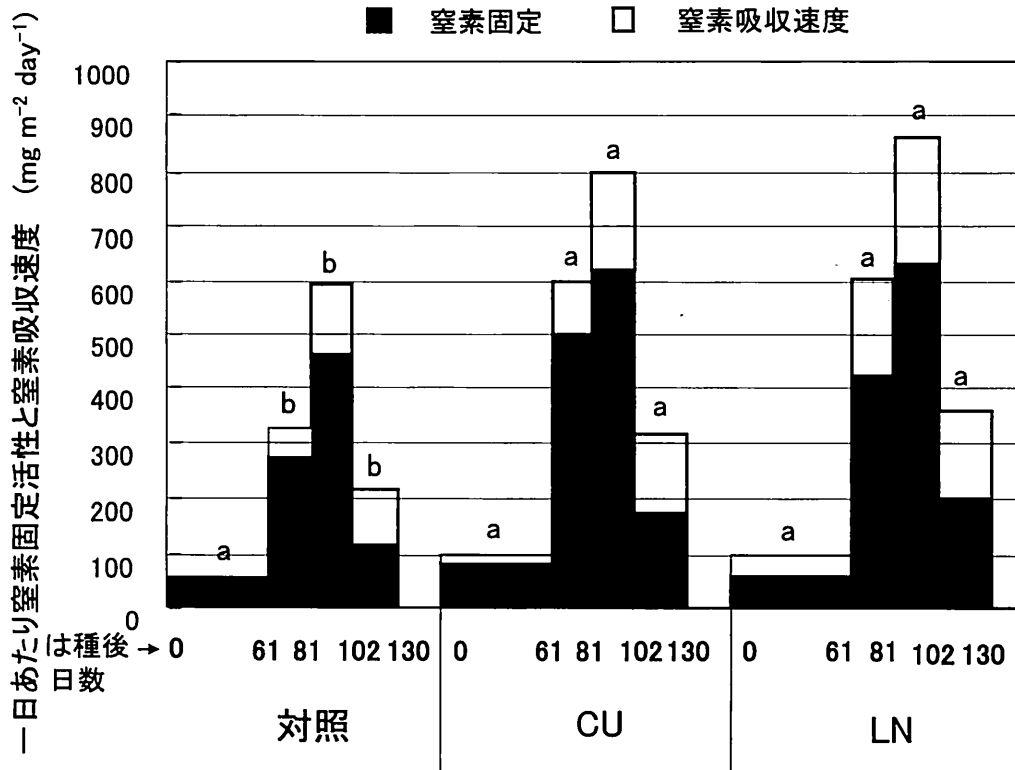


図 3-2-18 被覆尿素または石灰窒素深層施肥（深さ 20 cm）による施用量別施肥区の生育時期別窒素固定活性と窒素吸収速度の推移

処理区：対照；深層施肥なし。CU；被覆尿素（施用量 10 kgN/10a）。LN；石灰窒素（施用量 10 kgN/10a）。生育時期：R1；（播種 61 日後）開花始。R3；（播種 81 日後）着莢始。R5；（播種 102 日後）子実肥大始。R7；（播種 130 日後）成熟始。
図棒グラフの上のアルファベットが異なる場合はく 5% の有意差があることを示す。

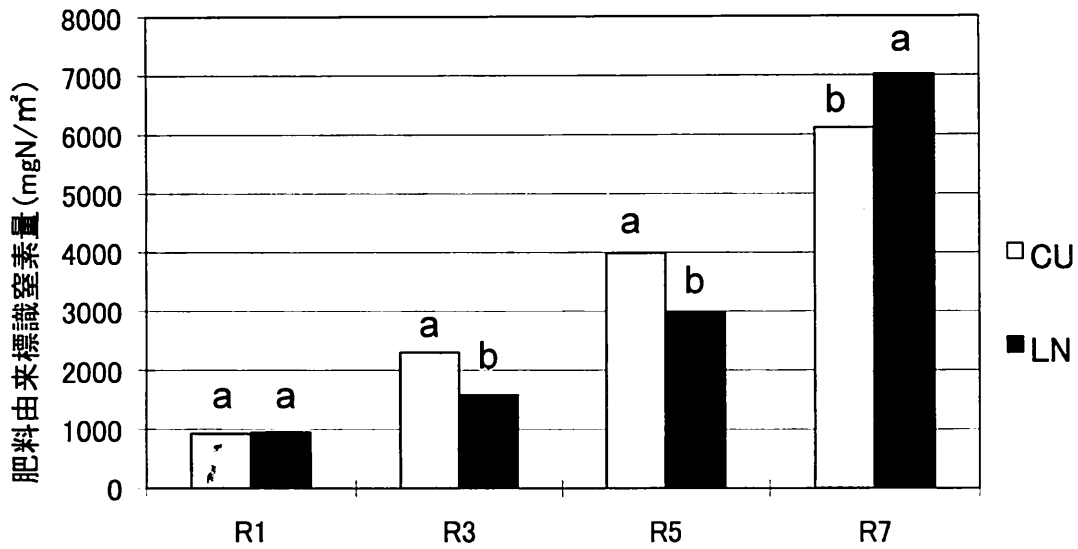


図 3-2-19 石灰窒素または被覆尿素の深層施肥（深さ 20 cm）区および対照区における生育時期別標識窒素吸収量の推移

処理区：対照；深層施肥なし．CU；被覆尿素（施用量 10 kgN/10a）．LN；石灰窒素（施用量 10 kgN/10a）．

生育時期：R1；開花始．R3；着莢始．R5；子実肥大始．R7；成熟始．

図棒グラフの上のアルファベットが異なる場合は< 5%の有意差があることを示す．

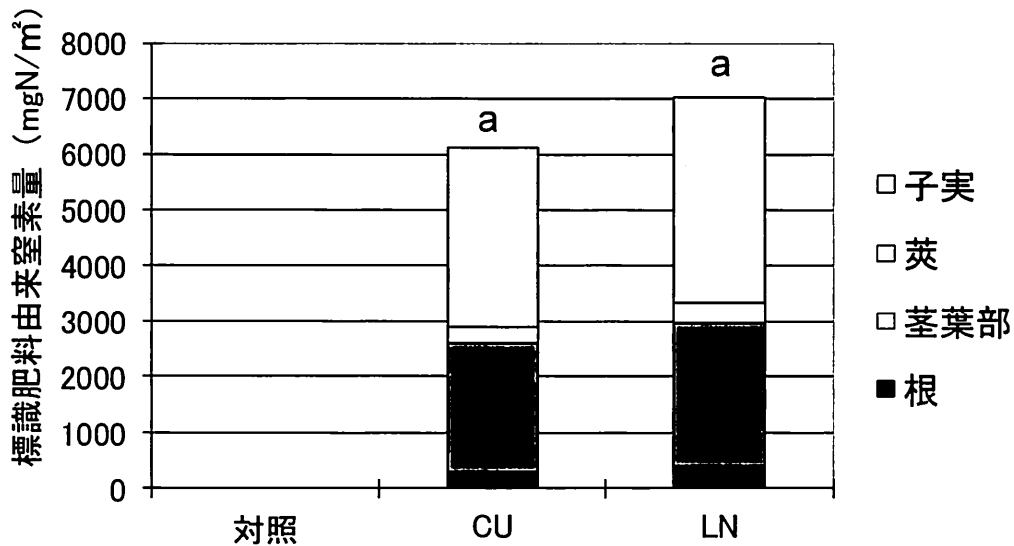


図 3-2-20 R7 期（成熟始）における石灰窒素または被覆尿素の深層施肥（深さ 20 cm）区の部位別標識窒素含有量

処理区：対照；深層施肥なし．CU；被覆尿素（施用量 10 kgN/10a）．LN；石灰窒素（施用量 10 kgN/10a）．

図棒グラフの上のアルファベットが異なる場合は< 5%の有意差があることを示す．

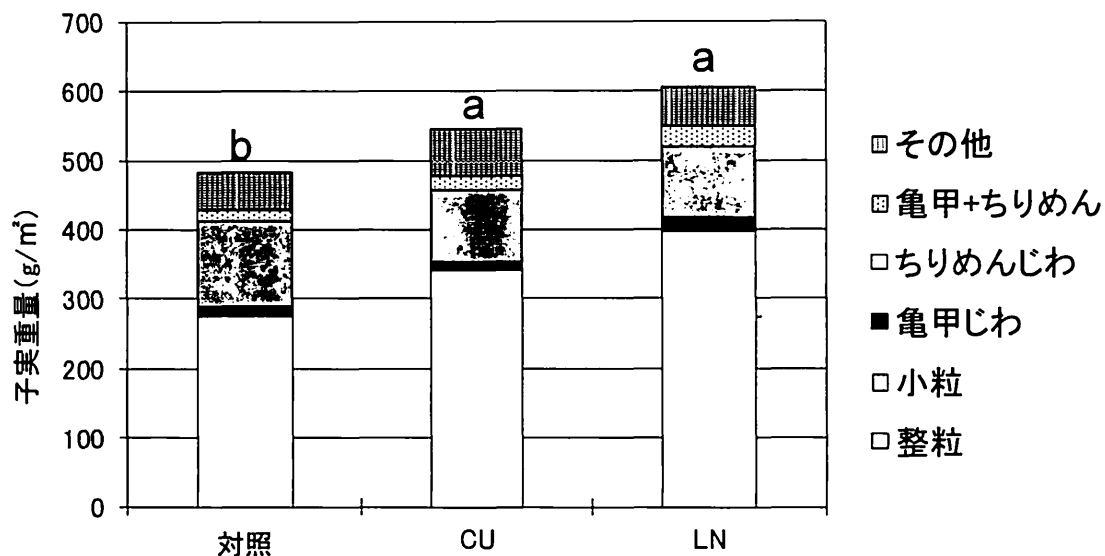


図 3-2-21 R8 期（収穫期）における石灰窒素または被覆尿素的深層施肥（深さ 20 cm）区および対照区の子実収量と品質

処理区：対照；深層施肥なし．CU；被覆尿素（施用量 10 kgN/10a）

LN；石灰窒素（施用量 10 kgN/10a）．

図棒グラフの上のアルファベットが異なる場合はく5%の有意差があることを示す

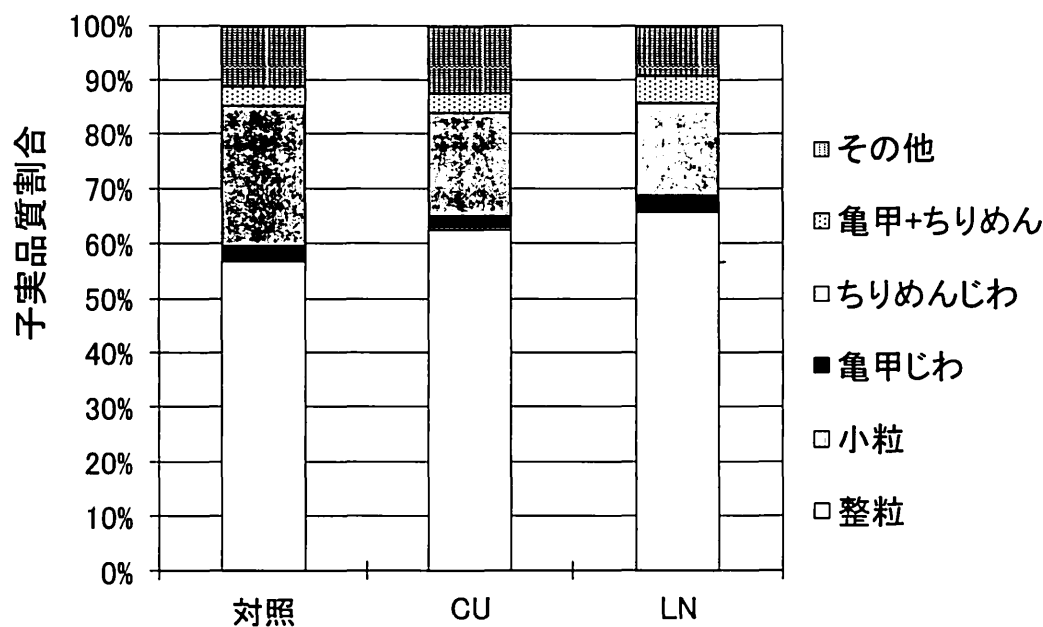


図 3-2-22 R8 期（収穫期）における石灰窒素または被覆尿素的深層施肥（深さ 20 cm）区および対照区の子実品質割合

処理区：対照；深層施肥なし．CU；被覆尿素（施用量 10 kgN/10a）

LN；石灰窒素（施用量 10 kgN/10a）

要素を示す。株当たり子実乾物重と子実数は、被覆尿素区と石灰窒素区で対照区より有意に高まり、両者に差はなかった。莢数、100粒重も同様の傾向を示した。主茎長は、対照区48 cmに対し、被覆尿素区53 cm、石灰窒素区50 cmであった。

茎基部から採取した導管液中のウレイド濃度および全窒素濃度（ウレイド+アミド+硝酸）は、どの区でもR1期からR3期に高まり、R5期からR7期にかけて低下した（図3-2-16）。相対ウレイド値（全窒素にしめるウレイド窒素の割合：窒素固定依存率）は、R1期の石灰窒素区を除きどの区でも大差なかった（図3-2-17）。

相対ウレイド値と株当たりの窒素集積量から、一日当たりの窒素固定活性と窒素吸収速度を算出した（図3-2-18）。被覆尿素と石灰窒素はほぼ同様なパターンを示し、窒素固定活性はどの時期にも対照区よりも高く推移し、窒素固定活性の阻害は認められなかった。被覆尿素深層施肥区では、R3期（播種後81日）までの窒素固定活性の促進効果が大きく、開花期以降窒素吸収も促進された。石灰窒素区では、R5期以降の窒素固定活性と窒素吸収速度が、被覆尿素より高かった。

図3-2-19に生育時期別の被覆尿素と石灰窒素由来窒素吸収量の推移を示す。両者由来の窒素は、R1期まではほぼ同等であるが、R3期、R5期には被覆尿素が石灰窒素を上回った。しかしながら、石灰窒素は、R5期からR7期にかけて多量に吸収され、R7期の石灰窒素吸収量は被覆尿素吸収量を上回った。図3-2-20にR7期の被覆尿素と石灰窒素由来窒素吸収量の部位別分配を示す。石灰窒素と被覆尿素的期間別分配率は、ほぼ同様であり、子実に約半分が分配された。

表3-2-6に、生育時期別の対照区、被覆尿素深層施肥区、石灰窒素深層施肥区の起源別由来窒素量（窒素固定由来窒素、肥料由来窒素、土壌由来窒素）を示す。R7期における全窒素量は、対照区28.4 gN/m²に対し、被覆尿素区43.3 gN/m²、石灰窒素区46.2 gN/m²と石灰窒素や被覆尿素的深層施肥で顕著に高まる事が確認された。さらに、窒素固定由来窒素量は、対照区21.4 gN/m²に対し、被覆尿素区32.1 gN/m²、石灰窒素区31.1 gN/m²と石灰窒素または被覆尿素的深層施肥で窒素固定が促進されることが明確に示された。

子実の外観的品質収量（図3-2-21）と品質割合（図3-2-22）は、被覆尿素または石灰窒素の深層施肥で改善され、整粒割合は、対照区57%に対し、被覆尿素区62%、石灰窒素区66%と増加した。同時にちりめんじわの割合が低下し、しわ粒低減に効果が見られた。

3) 考察

実験1において、石灰窒素の施肥深度の効果について、長岡の転換畑では、施肥深度10 cm、15 cmと比べて20 cmで高い増収効果が認められた。施肥深度20 cm区では、10 cm区、15 cm区と比較して、窒素固定活性の促進が著しく、かつ、肥料利用率、土壌窒素吸収も促進した。この理由として以下の点があげられる。①圃場の耕盤がちょうど20 cm下にあり、施肥した肥料が移動しにくいこと、②深い位置に施肥した石灰窒素は、尿素、アンモニアへの変換後、硝化されにくいこと、③地上部近傍に多く着生する根粒の生長や活性を阻害しにくいこと、④深い位置に施肥することにより、深部の根の発達を促し、土壌由来窒素も多く吸収したこと、などが考えられる。

実験2において、石灰窒素の施用量の影響については、施用量20 kgN/10aでは、収量は、10 kgN/10aよりも減収となった。これは、施肥窒素吸収量は増加したが、窒素固定の促進効果が10 kgN/10aよりも低下したためである。Yashimaら⁽²⁹⁾は、ダイズを上下二重のポットで栽培し、下部ポットの水耕液に硝酸を与えて、上部根の根粒形成と窒素固定に与える影響を調べた。その結果、下部ポットから、低濃度（1 mL/L）の硝酸を与えて栽培すると上部ポットの根粒形成と窒素固定を

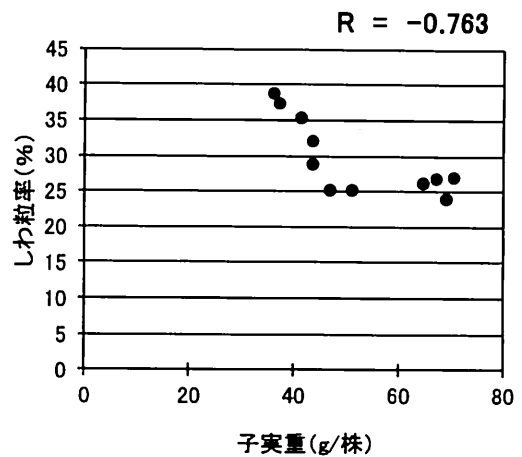
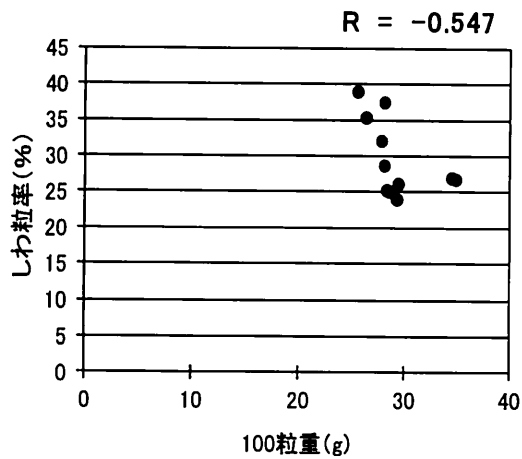


図 3-2-23 R8 期 (収穫期) における子実重 (100 粒重, 株あたり子実重) としわ粒 (亀甲じわ+ちりめんじわ) 率の関係

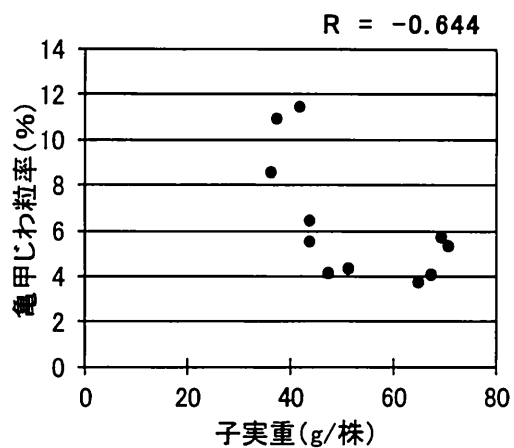
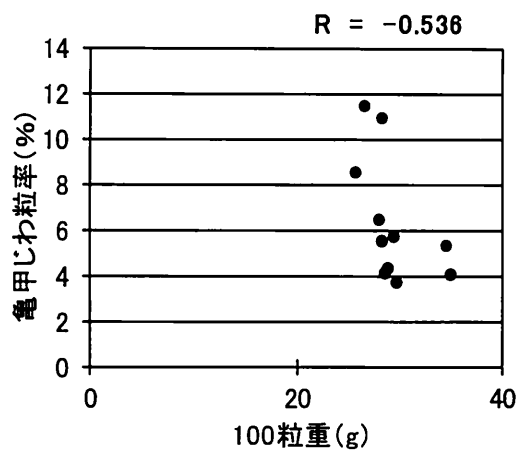


図 3-2-24 R8 期 (収穫期) における子実重 (100 粒重, 株あたり子実重) と亀甲じわ粒率の関係

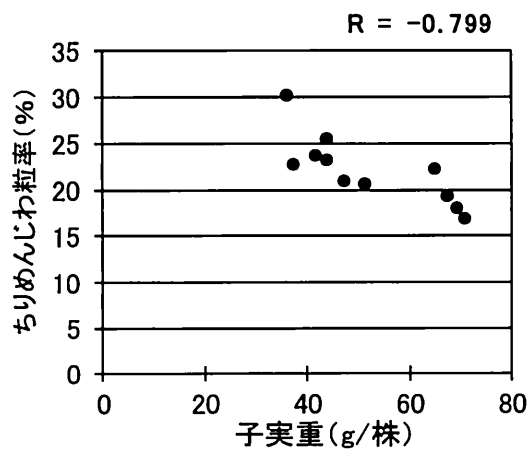
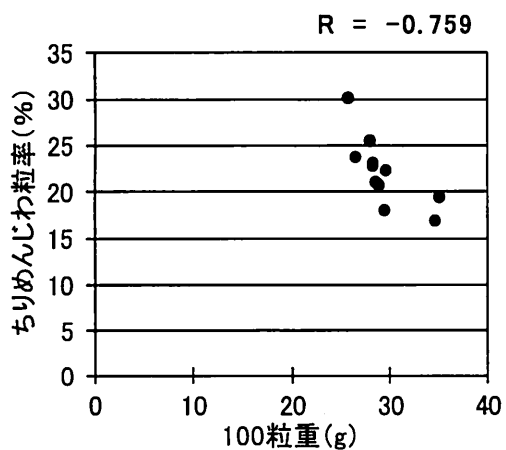


図 3-2-25 R8 期 (収穫期) における子実重 (100 粒重, 株あたり子実重) とちりめんじわ粒率の関係

促進するが、下部ポットに比較的高濃度（5 mM/L）硝酸を与えると、上部ポットの根粒生長も窒素固定活性も阻害された。たとえ根粒形成部位と離れた場所に与えた硝酸でも、高濃度の場合には、窒素要求量が吸収窒素で足りるため、根粒形成と窒素固定が抑制されると考えられる。施用量 20 kgN / 10a での窒素固定の阻害は同様な機構によると思われる。

石灰窒素と被覆尿素的比較については、これまで Tewari らの研究で、石灰窒素を深さ 20 cm の位置に 10 kgN / 10a 施肥することにより、被覆尿素と同等かそれ以上の増収効果が認められている⁽²¹⁻²⁸⁾。今回、石灰窒素と被覆尿素的の吸収経過を生育時期を追って調べた結果、石灰窒素は、R1 期（開花始）までは被覆尿素的の LP-100 とほぼ同様に吸収されるが、その後、被覆尿素より吸収が少なく、子実肥大始期（R5 期）から成熟始期（R7 期）までの子実が肥大シタンパク質を蓄える時期に大量の窒素を供給することが明らかとなった。このような窒素の供給パターンは、ダイズの窒素要求パターンと合致しており、窒素固定促進効果も高いものと考えられる。石灰窒素が、R5 期の施肥 100 日目以降に多量に吸収されることは、一般に考えられているよりもかなり遅い吸収とみられた。これは、石灰窒素を表土下 20 cm に施肥したため、硝化の遅れと、根が施肥位置に到達してから吸収されたことによるのではないと思われる。

被覆尿素と石灰窒素の深層施肥は、いずれもしわ粒割合を減じ、整粒割合を 10% 前後増加させ、ダイズの外観品質の向上に効果が認められた。表 3-2-7 に実験 1 から実験 3 までのしわ粒改善効果をまとめた。本実験結果では、石灰窒素の深層施肥でしわ粒を完全になくすことはできなかったが、一貫した軽減効果が確認された。ここで明らかなように、実験によらず約 10% のしわ粒率低下効果が見られ、亀甲じわ、ちりめんじわ両者ともに低減効果が認められた。これは、子実が肥大する時期に十分な量の窒素が供給されることにより、しわ粒の割合を減らすことができると考えられる。反対に生育後期に土壌条件や気象条件が悪く、窒素固定活性の早期の低落などにより窒素供給が不足すると、しわ粒割合が増し、品質が低下する恐れがある。しわ粒の発生率は裂皮粒率と高い相関がみられた^(10, 27) ことから、種皮の強度が弱いとしわ粒が発生する恐れがある。石灰窒素に含まれるカルシウムが細胞壁を補強し、しわ粒の発生を防いだ可能性もある。

図 3-2-23、図 3-2-24、図 3-2-25 に実験 1, 2, 3 における、子実 100 粒重または、収量（子実重 / 株）としわ粒発生率の関係を示す。図 3-2-23 に見られるように、亀甲じわとちりめんじわを加えたしわ粒率と子実収量の間には、高い負の相関（ $R = -0.763$ ）が認められた。同様なしわ粒発生率と子実収量の関係は、亀甲じわ（図 3-2-24）、ちりめんじわ（図 3-2-25）でも認められた。100 粒重としわ粒発生率とも同様の負の関係が認められた。これらの結果から、後期栄養が十分充足し、100 粒重、収量が高くなる条件では、しわ粒発生率が低下することが確認された。

Tewari ら⁽²⁴⁾ の新潟市新通の転換畑における 2002 年の試験では、尿素または被覆尿素的を、全層施肥または深層施肥を行った。この実験では、対照区も含めて、亀甲じわ 4-7%、ちりめんじわ 3-5% としわ粒の発生率は長岡における試験（対照区 35-40%）より低く、かつ施肥処理間に差が見られなかった。新通圃場は、地力が高く、後期の窒素発現が高かったことが原因と思われる。近年、地力の低下によるダイズ収量と品質の低下が問題となっているが、収量のみならず、しわ粒低下の面からも地力維持が求められる。

緩効性窒素肥料の深層施肥による増収効果については、次のように考えられる。高橋らの一連の研究で、被覆尿素的（LP-100）の深層施肥による増収効果は、深層施肥した肥料が R1 期（開花始）以降に効率的に吸収されることと同時に、窒素肥料、特に阻害効果の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触せず、窒素固定を阻害しないことが明らかにされている。また、被覆

表 3-2-3 石灰窒素の施肥量による黄葉期 (R7) ダイズの生育に及ぼす影響

	子実重 g/株	子実数 個/株	100粒重 g	莢数 個/株	主茎長 cm	主茎節数 個/株	茎径 mm
対照	41.5	157	26.4	68	35.2	8.5	11.2
A5	51.5	178	28.7	88	45.3	9.3	10.6
A10	69.1	236	29.3	113	48.3	9.3	11.8
A20	47.1	213	28.4	88	42.6	10.7	11.3

対照：深層施肥なし。 A5 :5 kgN/10a 施肥。 A10 :10 kgN/10a 施肥。 A20 :20 kgN/10a 施肥。
(深さ 20 cm, 播種密度 8.9 株/m²)

表 3-2-4 施肥量による黄葉期 (R7) におけるダイズの窒素固定, 土壌, 肥料由来窒素量の比較

窒素量 (gN/m ²)				
処理区	固定窒素	土壌窒素	肥料窒素	全窒素
対照	14.4	8.3	0.0	22.7
A5	20.1	9.0	0.3	29.4
A10	27.7	10.1	0.7	38.5
A20	19.4	10.7	1.0	31.1

対照：深層施肥なし。 A5 :5 kgN/10a 施肥。 A10 :10 kgN/10a 施肥。 A20 :20 kgN/10a 施肥。
(深さ 20 cm, 播種密度 8.9 株/m²)

表 3-2-5 被覆尿素 (CU) と石灰窒素 (LN) 深層施肥と対照区の収量構成要素

処理	主茎長 cm	主茎径 cm	株あたり総節数 個	株あたり莢数 個	株あたり子実数 個	株あたり子実重 g	100粒重 g
対照区	47.6b	10.9b	59.5b	66.5b	132.1b	37.1b	28.1b
CU区	52.9a	12.5ab	68.3a	81.5a	192.8a	67.2a	34.9a
LN区	50.0a	13.0a	66.0a	82.3a	204.8a	70.6a	34.5a

値の後の異なるアルファベットは処理区間の 5%水準の有意差を示す。

尿素の深層施肥により、施肥位置近辺の深根の発達を促し、土壌の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、クロロフィル含量も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月上中旬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、節あたり莢数が増加し、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)が全く蓄積していなかった⁽¹⁵⁾。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分解後、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、特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。従って、根系上部で窒素固定を、根系

表 3-2-6 被覆尿素 (CU) と石灰窒素 (LN) 深層施肥と対照区の窒素固定由来窒素, 肥料由来窒素, 土壌由来窒素の推定値

生育時期	処理	全窒素含有量	窒素固定由来窒素	肥料由来窒素	土壌由来窒素
		gN/m ²	gN/m ² (%)	gN/m ² (%)	gN/m ² (%)
R1	対照区	3.3b	2.8c (85.2)	— (0)	0.5b (14.8)
	CU区	5.9a	4.8a (81.4)	0.9a (15.3)	0.3b (3.4)
	LN区	5.8a	3.6b (62.1)	1.0a (17.2)	1.2a (20.7)
R3	対照区	9.9b	8.4c (84.8)	— (0)	1.5b (15.2)
	CU区	17.6a	14.4a (81.8)	2.3a (13.1)	0.9c (5.1)
	LN区	18.1a	12.3b (68.0)	1.6a (8.8)	4.2a (23.2)
R5	対照区	22.3b	18.1b (81.2)	— (0)	4.2b (18.8)
	CU区	34.3a	27.3a (79.6)	4.0a (11.7)	3.0c (8.7)
	LN区	36.1a	25.5a (70.6)	3.0a (8.3)	7.6a (21.1)
R7	対照区	28.4b	21.4b (75.4)	— (0)	7.0ab (24.6)
	CU区	43.3a	32.1a (74.1)	6.1a (14.1)	5.1b (11.8)
	LN区	46.2a	31.1a (67.3)	7.0a (15.2)	8.1a (17.5)

値の後の異なるアルファベットは処理区間の 5%水準の有意差を示す。

表 3-2-7 R7 期における, 石灰窒素または, 被覆尿素的施肥によるしわ粒率低減効果 (まとめ)

年	圃場	処理	整粒	亀甲じわ	ちりめんじわ	亀甲+ちりめん	しわ粒計	しわ粒改善率	子実窒素濃度	子実重	100粒重
			%	%	%	%	%	%	mgN/gDW	g/m ²	g
2003	長岡転換畑	対照	50.6	8.6	30.3	*1)	38.9	—	61.7	320	25.6
		D10	65.0	5.6	23.3	*	28.8	10.1	61.4	387	28.2
		D15	58.4	6.5	25.6	*	32.1	6.8	62.7	389	27.9
		D20	65.6	3.8	22.4	*	26.2	12.7	58.6	576	29.5
2003	長岡転換畑	対照	54.9	11.5	23.9	*	35.4	—	62.6	369	26.4
		A5	68.6	4.4	20.8	*	25.2	9.8	59.0	455	28.7
		A10	68.9	5.8	18.2	*	24.0	11.0	61.8	615	29.3
		A20	67.8	4.2	21.1	*	25.3	10.1	60.3	419	28.4
2005	長岡転換畑	対照	52.5	11.0	22.9	3.4	37.4	—	60.9	330	28.1
		CU	64.1	4.1	19.5	3.4	26.9	10.4	59.6	598	34.9
		LN	64.1	5.4	17.0	4.8	27.1	10.2	60.5	628	34.5

1) *は、計測せず。

下部では無機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。

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。石灰窒素の主成分であるシアナミドは, 尿素を経てアンモニアに変化し, 硝化作用を受けて硝酸となる。石灰窒素に含まれるまたは石灰窒素の分解中に生じ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, かつ, ダイズにおける根粒形成と窒素固定は共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ことが示された^(4, 7)。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あ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, 流亡や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, 硝酸が集積せず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、発根等に対する阻害作用があるが、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 (10 kgN/10a) の深層施肥により、被覆尿素 (10 kgN/10a) と同等の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。

本報告で紹介したように、石灰窒素の施肥深度により効果は異なり、10 cm、15 cm と比べて、20 cm の深さで 10 kgN/10a 施肥した区が、子実増収効果が高かった。また、窒素固定の促進効果も 20 cm 区が他区を凌駕した。さらに、施肥量についても、10 kgN/10a が最高値を示し、20 kgN/10a では、むしろ減収となった。ただし、最適施肥深度や施肥量は圃場により異なることが予想されるため、それぞれの圃場で施肥量や施肥深度について最適値を検討する必要があるだろう。一方で、深層施肥機が普及していない現在、シグモイド型の被覆尿素的側条施肥などの方法でも増収としわ粒の改善が可能である⁽²⁰⁾。

品質改善効果については、石灰窒素の施肥で、整粒重量と整粒割合が増加し、一貫した品質改善効果が認められた。これは、子実充実期に窒素栄養条件が改善されたことによる可能性がある、さらに、石灰窒素に含まれるカルシウムがしわ粒防止に役立った可能性もある。

石灰窒素や被覆尿素的深層施肥はダイズの安定多収と品質改善に効果的であるとともに、肥料利用率が高く、硝酸による地下水汚染防止等の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汎用性のある深層施肥播種ユニットの量産と普及が望まれる。

4) 摘要

新潟県農業総合研究所 (長岡) の水田転換畑で試験を行った。石灰窒素の施肥深度に関しては、深さ 20 cm 施用で 10 cm、15 cm よりも高い収量が得られた。施肥窒素吸収量は、施肥深度による差は見られなかったため、収量の差は主に窒素固定の促進効果の違いによると考えられる。

石灰窒素の施肥量は、10 kgN/10a でもっとも高い収量が得られ、20 kgN/10a 区では、施肥窒素の吸収量は増えたが、収量は 10 kgN/10a より低かった。20 kgN/10a 区では、窒素固定の阻害が収量低減の原因と考えられる。

石灰窒素や被覆尿素的深層施肥により、亀甲じわやちりめんじわ割合の低減効果が見られた。これは、肥料由来窒素の供給と窒素固定の促進による子実肥大期間の窒素栄養の改善によると考えられる。

石灰窒素と、被覆尿素的の時期別吸収量を比較すると、開花期では、ほぼ同量であったが、その後 R5 期までは、石灰窒素の吸収の方が低く推移したが、R7 期には逆転し、石灰窒素の吸収量が被覆尿素的を上回った。石灰窒素の深層施肥は、被覆尿素的と同様なパターンで窒素をダイズに供給することから、生育、収量、子実品質にほぼ同様な効果を与えることが確認された。

5) 引用文献

1. Fujikake, H., H. Yashima, T. Sato, N. Ohtake, K. Sueyoshi, and T. Ohya (2002) Rapid and reversible nitrate inhibition of nodule growth and N_2 fixation activity in soybean (*Glycine max* (L.) Merr.). *Soil Sci. Plant Nutr.*, 48, 211-217
2. 大山卓爾 (1990) “第 V 章 窒素化合物分析法”. 植物栄養実験法. (日本土壤肥料学会監修)

博友社, 174-203

3. 大山卓爾・高橋能彦・池主俊昭・中野富夫 (1992) 単純相対ウレイド法による圃場栽培ダイズの窒素固定活性と窒素吸収速度の評価. 農業および園芸, 67, 1157-1164
4. 大山卓爾 (2000) ダイズの特性と収量の考え方. 農業技術大系追録, 第22号, 農文協, 技3-
5. Ohyama, T., K. Tewari, T. Suganuma, H. Fujikake, A.L. Salwa, S. Ruamrungsri, N. Ohtake, K. Sueyoshi, T. Sato, and Y. Takahashi, (2004) Deep placement of N fertilizer promotes soybean growth and seed yield without depressing symbiotic nitrogen fixation. Trends in Soil Science, 3, 19-33
6. Ohyama, T., K. Tewari, A.L. Salwa, S. Ruamrungsri, S. Komiyama, S. Ito, A. Yamazaki, K. Sueyoshi, and N. Ohtake (2004) Direct analysis of ^{15}N abundance of Kheldahl digested solution by emission spectrometry. Bull. Facul. Agric. Niigata Univ., 57 (1), 33-40
7. 大山卓爾・伊藤小百合・大竹憲邦・末吉邦 (2006a) 硝酸イオンによるダイズ根粒の肥大生長と窒素固定活性の阻害機構. 化学と生物, 44, 752-759
8. 大山卓爾・ティワリ カウサル・高橋能彦 (2006b) 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>. 石灰窒素だより, 141, 1-9
9. 大山卓爾・ティワリ カウサル・大竹憲邦・高橋能彦 (2006c) ダイズ根粒の窒素固定を活用する緩効性窒素肥料の深層施肥とペーパーポット移植栽培. 農業および園芸, 81, 696-705
10. 大山卓爾・ティワリ カウサル・大竹憲邦・末吉邦・高橋能彦 (2006d) ダイズの生育, 収量, 品質に及ぼす石灰窒素の施肥深度, 施肥量, 他成分の影響. 季刊雑誌「肥料」, 105, 56-67
11. 大山卓爾 (2006e) 根粒の窒素固定と調和した緩効性窒素肥料深層施肥によるダイズの多収栽培. 日作紀, 75, 386-390
12. Takahashi, Y., T. Chinushi, Y. Nagumo, T. Nakano and T. Ohyama (1991) Effect of deep placement of controlled release nitrogen fertilizer (coated urea) on growth, yield and nitrogen fixation of soybean plants. Soil Sci. Plant Nutr., 37, 223-231
13. Takahashi, Y., T. Chinushi, T. Nakano and T. Ohyama (1992) Evaluation of N_2 fixation and N absorption activity by relative ureide method in field grown soybean plants with deep placement of coated urea. Soil Sci. Plant Nutr., 38, 699-708
14. 高橋能彦・池主俊昭・中野富夫・大山卓爾 (1993a) 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
15. 高橋能彦・池主俊昭・中野富夫・大山卓爾 (1993b) 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の土壌中における動態. 日本土壌肥料学雑誌, 64, 338-340
16. Takahashi, Y., T. Chinushi and T. Ohyama (1993c) Quantitative estimation of N_2 fixation and absorption rate in field grown soybean plants by relative ureide method. Bull. Fac. Agric. Niigata Univ., 45, 91-105
17. Takahashi, Y., T. Chinushi, T. Nakano and T. Ohyama (1994) Yield components of soybean plants with deep placement of N fertilizer, related to high productivity. J. Niigata Agric. Exp. Stn., 40, 7-15
18. Takahashi, Y. and T. Ohyama (1999) Technique for deep placement of coated urea fertilizer in soybean cultivation. JARQ, 33, 235-242

19. 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
20. Takahashi, Y., N. Ohtake, M. Hattori, Y. Nagumo and T. Ohya (2006) Effect of basal side-dressing of various types of coated urea fertilizer on shoot growth, yield components and seed composition of soybean (*Glycine max* (L.) Merr.) . Soil Sci. Plant Nutr., 52, 264-273
21. Tewari, K., T. Sukanuma, H. Fujikake, N. Ohtake, K. Sueyoshi, Y. Takahashi and T. Ohya (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
22. 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. 日本土壤肥料学雑誌, 74, 183-189
23. Tewari, K., T. Sukanuma, H. Fujikake, N. Ohtake, K. Sueyoshi, Y. Takahashi and T. Ohya (2004a) 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. of Agronomy and Crop Science, 190, 46-58
24. Tewari, K., M. Onda, S. Ito, A. Yamazaki, H. Fujikake, N. Ohtake, K. Sueyoshi, Y. Takahashi and T. Ohya (2004 b) Effect of placement of urea and coated urea on yield and quality of soybean (*Glycine max* (L.) Merr.) seed. Soil Sci. Plant Nutr., 50, 1245-1254
25. Tewari K., M. Onda, S. Ito, A. Yamazaki, H. Fujikake, N. Ohtake, K. Sueyoshi, Y. Takahashi and T. Ohya (2004) 14th International Congress on Nitrogen Fixation (Beijin)
26. Tewari, K., M. Onda, S. Ito, A. Yamazaki, H. Fujikake, N. Ohtake, K. Sueyoshi, Y. Takahashi and T. Ohya (2005a) ¹⁵N analysis of promotive effect of deep placement of slow release N fertilizers on growth and seed yield of soybean. Soil Sci. Plant Nutr., 51, 501-512
27. Tewari, K., M. Onda, N. Sato, S. Ito, A. Yamazaki, H. Fujikake, N. Ohtake, K. Sueyoshi, Y. Takahashi and T. Ohya, (2005b) Comparison of the effects of application of deep placement of slow release N (lime nitrogen and coated urea), P and K fertilizers on yield and quality of soybean (*Glycine max* (L.) Merr.) seed. Bull. Facul. Agric. Niigata. Univ., 58, 45-53
28. Tewari, K., M. Onda, S. Ito, A. Yamazaki, H. Fujikake, N. Ohtake, K. Sueyoshi, Y. Takahashi, Y. Nagumo, T. Tsuchida and T. Ohya (2006a) Effect of deep placement of slow release fertilizer (lime nitrogen) applied at different rates on growth, N₂ fixation and yield of soybean (*Glycine max* [L.] Merr.) . J. of Agronomy and Crop Science, 192, 417-426
29. Yashima, H., H. Fujikake, A. Yamazaki, S. Ito, T. Sato, T. Kaushal, N. Ohtake, K. Sueyoshi, Y. Takahashi and T. Ohya (2005) 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

謝辞：本研究は、農林水産省「先端技術を活用した農林水産研究高度化事業：北陸地域に多発する大豆しわ粒の防止技術の開発」により実施しました。関係各位には、深謝申し上げます。また、¹⁵N 標識石灰窒素をご提供頂いた石灰窒素工業会に深謝申し上げます。