

研究論文

栽培

カバークロップに用いた冬作オオムギが 不耕起栽培ダイズの菌根形成に与える影響

島崎由美¹⁾・内田智子²⁾・小林浩幸²⁾

(¹⁾ 中央農業総合研究センター, ²⁾ 東北農業研究センター)

要旨：オオムギをダイズの前作として刈り敷くカバークロップ栽培は、ダイズの不耕起栽培で問題となる一年生夏雑草の抑制や省力化のために開発された。一方で、カバークロップ栽培にはダイズに増収効果が認められるが、その機構は明らかではない。要因の一つとしてオオムギ残渣からの窒素の供給が考えられているが、本研究では、カバークロップ栽培法におけるオオムギとダイズのアーバスキュラー菌根 (AM) の形成の関係を検討した。その結果、カバークロップ栽培ではダイズの AM 形成率が大きいことが明らかになった。また、オオムギの根長密度と AM 形成率はオオムギの播種期が早いほど大きくなった。さらに、オオムギの AM 形成率は土壌深層部ほど大きかった。オオムギの根長密度と AM 形成率を掛け合わせることで求めた AM 形成根長密度は、オオムギの播種期が早いほど大きかった。ダイズの AM 形成率とオオムギの深さ 0~20 cm の AM 形成根長密度は有意な相関関係があった。これらの結果はオオムギを用いたダイズのカバークロップ栽培では、土壌の深さ 0~20 cm のオオムギの AM 菌がダイズに対する接種源として機能し、ダイズの AM 形成に関与したことを示唆している。

キーワード：アーバスキュラー菌根, オオムギ, カバークロップ, ダイズ。

ダイズ不耕起栽培は省力化や低コスト、土壌の侵食防止などの様々な利点のために多くの国で行われている。それにもかかわらず日本では雑草コントロールの難しさからダイズ不耕起栽培はほとんど行われていない (Kobayashi ら 2004)。そのような中 Kobayashi ら (2004) は、秋に前作として播種したオオムギを収穫せずにダイズの播種前に細断し、マルチ状に地面を覆いダイズを不耕起播種する栽培法 (以降、カバークロップ栽培とする) を開発した。このカバークロップ栽培では不耕起栽培で問題となる一年生夏雑草の出芽を抑え、かつ省力化でき、さらにダイズも増収することが確認された (Kobayashi ら 2004, 小林・小柳 2005, 小林ら 2007)。

カバークロップ栽培においてはダイズの収量が増加するが (小林・小柳 2005)、その要因はオオムギ残渣からの養分の供給や、オオムギ茎葉の刈り敷きに起因する根粒菌の活性維持が考えられた (小林ら 2007)。カバークロップ栽培では冬作のオオムギが窒素を吸収するため、ダイズ播種時の可給態窒素が少ないが、ダイズの初期生育はカバークロップがない場合と比較しても遜色ないことを著者らは確認している。

矢野 (2006) は、宿主作物の生育を促進する根粒菌による窒素固定には多くのリン酸が必要であるが、リン酸栄養はアーバスキュラー菌根 (AM) の形成によって改善されることを指摘している。さらに、休閒や AM を形成しない植

物の栽培の後よりも AM を形成する前作物やカバークロップの栽培の後で作物の収量が増加すること、その要因として後作物の AM 形成率が増加することが報告されている (Boswell ら 1998, 磯部・坪木 1999, Arihara and Karasawa 2000, Karasawa ら 2001, 2002, 白木・山本 2003)。また、後作物の AM 形成率が増加する要因として、作土中に胞子が多く形成され、外生菌糸が多く存在することが挙げられる (Boswell ら 1998, Karasawa ら 2002, 白木・山本 2003)。特に冬作カバークロップは AM 菌の宿主として機能し、それゆえ後作物に対する AM 菌の接種源としての能力を冬期維持あるいは向上させる (Dodd and Jeffries 1986, Boswell ら 1998, 磯部・坪木 1999)。

また、従来根系における AM 形成率は、根系を均質のものとして測定されてきた。しかし、根の部位や細胞の齢によって AM の形成されやすさが異なることが報告されており (Amijee ら 1993, Yano ら 1996)、根系の中でも AM 形成率に差があることが予想される。しかし、圃場における AM 形成の分布に関する情報はほとんどない。

そこで本研究では AM の形成に着目し、カバークロップ処理がダイズの生育に及ぼす影響を検討する。まず、カバークロップ栽培において収量およびダイズの AM 形成率が大きくなることを確認する。次に、オオムギの AM 形成率を深さ別に調査することで、オオムギの AM 菌がダイズへの接種源として機能した可能性について検討するとともに、

カバークロップとしてのオオムギの播種適期を明らかにすることを目的とした。

材料と方法

実験1：カバークロップ栽培におけるダイズの収量とAM形成率

実験は2005年から2006年に東北農業研究センター福島研究拠点内の圃場(淡色黒ボク土)で行った。カバークロップとしての冬作オオムギの有無とオオムギ播種前の秋施肥の有無の2要因の要因実験とし、3反復の乱塊法とした。1区面積は27.45 m²とした。

カバークロップ区(CF区, CN区)ではオオムギ(*Hordeum vulgare* L.: 品種べんけいむぎ)を全面耕起後10 kg 10 a⁻¹, 条間25 cmの密度で2005年10月26日に播種した。ダイズ単作区(SF区, SN区)でも同日に全面耕起した。秋施肥有り区(CF区, SF区)では速効性の化成肥料(14:14:14)により, N, P₂O₅, K₂O=6, 6, 6 kg 10 a⁻¹を全量基肥として全層全面施肥した。秋施肥なし区(CN区, SN区)では耕起後施肥はしなかった。オオムギ播種後あるいは耕起後, 全区に除草剤(pendimethalin 0.12 g a. i. m⁻²)を散布した。

ダイズ(*Glycine max* Merr.: 品種ふくいぶき)は5月30日に条間50 cm, 5 kg 10 a⁻¹で播種した。オオムギはダイズ播種日にハンマーナイフモア(共栄社製, HMA80)でその場に細断し敷いた。ダイズ播種前に作土土壌(0~20 cm)を1区3箇所から採取し, 2 mm目のふるいでふるった後風乾し, 可給態リン酸をトルオーグ法にて測定した。肥料は即効性の化成肥料(5:20:20)により, N, P₂O₅, K₂O=3, 12, 12 kg 10 a⁻¹を全量基肥として土壌表面に全区施肥した。播種後全区に除草剤(thiobencarb 0.35 g a. i. m⁻², pendimethalin 0.04 g a. i. m⁻², linuron 0.05 g a. i. m⁻²)を散布した。

播種後58日にダイズ5~6個体を採取した。この際, 1株占有面積から丁寧に根を回収した。地上部は70℃で3日間通風乾燥し, 乾物重を求めた。地下部は新鮮重を求めた後, 一部をAM形成率の測定に用い, 残りを乾燥し乾物重を求めた。

あわせてダイズの主茎長を播種後毎週測定した。坪刈り収穫は成熟期に達したもののから10月11日から16日に順次行った。収量調査では子実収量, 全重, 節数, 莢数, 整粒数, 100粒重, 整粒重/全粒重を求めた。ただし, 整粒は屑粒以外のすべての粒とした。

AM形成率の測定は, 採取した根を良く水洗いし, 土壌粒子を取り除いた後, 10% KOHを加え容器ごと80℃に温めた水中で10分間加熱した。その後根を2% HClで酸性化し, 0.05%トリパンブルーで染色した(大場ら2006)。AM形成率はMcGonigleら(1990)の方法に基づき, プレパラートを作成し光学顕微鏡下で観察し, 観察交点に占めるAM形成交点の割合として求めた。

実験2：オオムギの播種期の違いがダイズのAM形成率に及ぼす影響

実験は2005年から2006年に東北農業研究センター福島研究拠点の圃場(淡色黒ボク土)において行った。オオムギの播種期5水準, オオムギ播種量2水準の2要因, 1反復の完全無作為化法にて行った。1区面積は9.6 m²とした。

全面耕起後, オオムギ(品種:べんけいむぎ)は条間25 cm, 10 kg 10 a⁻¹(S区)あるいは20 kg 10 a⁻¹(D区)の密度で2005年10月5日, 10月26日, 11月22日, 2006年3月28日, 4月26日にそれぞれ播種した。オオムギ播種時の施肥は速効性の化成肥料(14:14:14)により, N, P₂O₅, K₂O=6, 6, 6 kg 10 a⁻¹を全量基肥として全面全層施肥した。播種後, 除草剤の散布は行わなかった。

ダイズ(品種:ふくいぶき)は5月26日に条間50 cm, 5 kg 10 a⁻¹で播種した。肥料は即効性の化成肥料(5:20:20)により, N, P₂O₅, K₂O=3, 12, 12 kg 10 a⁻¹を全量基肥として土壌表面に全区施肥した。施肥, ダイズ播種前日にオオムギ地上部を1区あたり2畝(各1 m), 作土土壌(0~20 cm)を1区3箇所から採取した。オオムギ地上部は風乾後重量および茎数を計測した。そのうち30茎を取り出し70℃で3日間通風乾燥し乾物重を求め, 1 m²あたりの地上部乾物重を計算した。土壌は風乾後2 mm目のふるいでふるい, 可給態リン酸をトルオーグ法にて測定した。また, このときのオオムギの根系を畝と直角方向に各区1箇所から改良モノリス法にて採取した(5 cm×30 cm×30 cm)。この土塊を深さ0~10 cm, 10~20 cm, 20~30 cmの3つに分け, Murakamiら(1999)の方法を用いて洗い出した。根長をルートスキャナー(Comair社製)で測定し, 根長密度を求めた。その後, 実験1と同様に染色し, AM形成率を測定した。AMバイオマスの指標として根長密度にAM形成率を乗じた値(AM形成根長密度)を求めた。

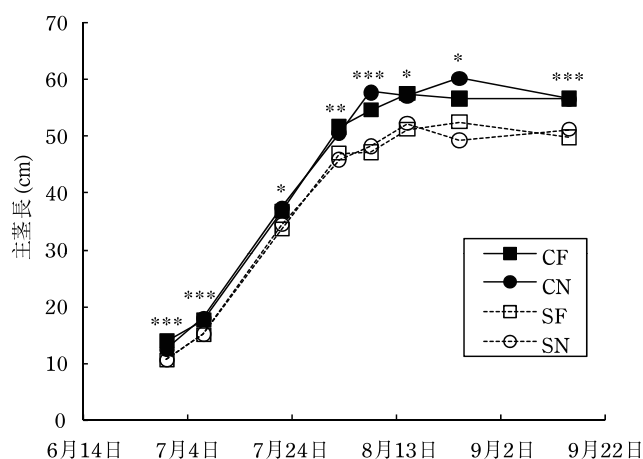
オオムギ地上部はダイズ播種直後にハンマーナイフモア(共栄社製, HMA80)でその場に細断し土壌の表面に均一に敷いた。

ダイズは播種後34日に各区生育中庸な2個体を採取し, 2個体をまとめて分析に供した。根は1株占有面積をスコップで掘り起こし, 丁寧に回収した。地上部は乾燥し乾物重を測定した後粉碎し, 硝酸と過塩素酸で分解した。地上部リン濃度を比色法(Murphy and Riley 1962)で測定した。地下部は水中で丁寧に土壌粒子を取り除いた後, 実験1と同様に染色しAM形成率を測定した。

結 果

実験1：カバークロップ栽培におけるダイズの収量とAM形成率

ダイズの生育の指標として主茎長を比較した(第1図)。主茎長はいずれの区においても7月後半まで直線的に増加し, その後頭打ちとなった。すべての生育期間を通じて, ダイズの主茎長はカバークロップ区(CF, CN)でダイズ



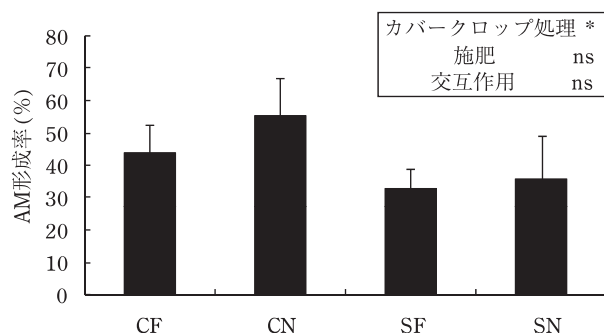
第1図 ダイズ主茎長の推移 (実験1)。

ダイズ播種日は2006年5月30日。カバークロップ区(C区)は黒塗り、単作区(S区)は白抜き、施肥区(F区)は四角、無施肥区(N区)は丸で示した。*, **, ***はそれぞれ5%, 1%, 0.1%水準でカバークロップ処理による有意な差があることを示す(二元配置分散分析による)。

単作区(SF, SN)に比べ有意に大きくなり、最終的に主茎長はカバークロップ区でダイズ単作区より約6 cm大きかった。一方、オオムギ播種前の施肥の有無によるダイズの主茎長には有意差は見られなかった。

ダイズの子実収量は、CF, CN, SF, SNの順に大きかった(第1表)。カバークロップ区で子実収量は0.1%水準で有意に大きくなった。また、全重、節数、整粒数、100粒重、全粒重に占める整粒重の割合もカバークロップ区で有意に大きかった。しかし、莢数はカバークロップ処理による有意な違いは見られなかった。一方、オオムギ播種前の施肥によって節数は小さくなったものの、その他のパラメーターに関しては有意な差は見られなかった。また、カバークロップ処理と施肥の交互作用はいずれのパラメーターにおいても有意ではなかった。

播種後58日のダイズAMの形成率は30%から60%であった(第2図)。AM形成率はダイズ単作区と比べ、カバークロップ区において5%水準で有意に大きかった。一方、



第2図 播種後2ヶ月のダイズの根の菌根(AM)形成率(実験1)。略号はそれぞれ、CF(カバークロップ、秋施肥有り)、CN(カバークロップ、秋施肥無し)、SF(ダイズ単作、秋施肥有り)、SN(ダイズ単作、秋施肥無し)を示す。棒線は標準偏差を示す。*はカバークロップ処理によって5%水準で有意な差があることを示す(二元配置分散分析による)。

オオムギ播種前の施肥の有無によってダイズのAM形成率に有意な違いは見られなかった。カバークロップ処理と施肥の交互作用も有意ではなかった。

実験を行った土壌の可給態リン酸濃度は、施肥の有無、カバークロップの有無に関わらず、 $16.1 \text{ mg} \sim 33.9 \text{ mg P}_2\text{O}_5 \text{ kg}^{-1}$ であった(トルオーグ法による)。このとき、施肥とカバークロップの交互作用は有意ではなかった。

実験2：カバークロップオオムギの播種期の違いがダイズのAM形成率に及ぼす影響

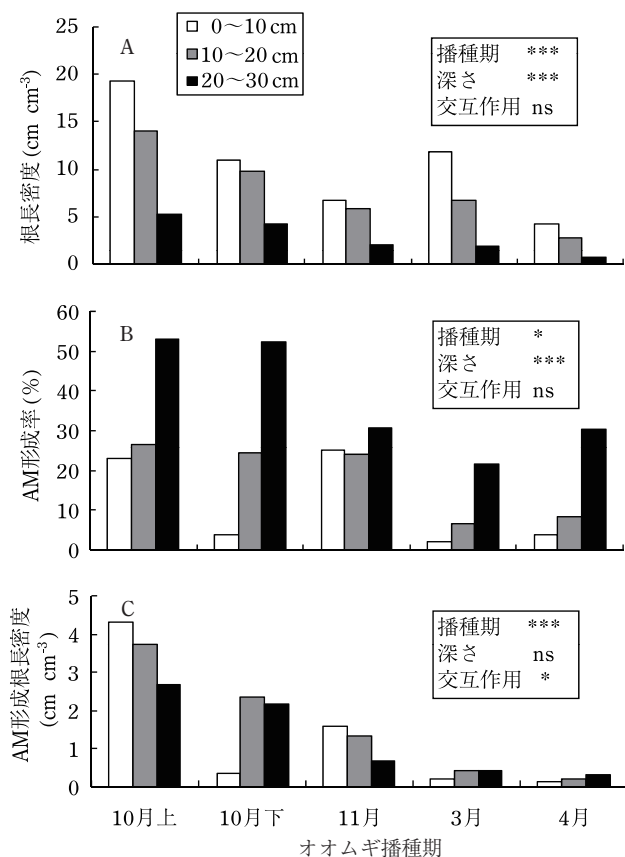
ダイズ播種時の土壌中の可給態リン酸濃度は、 $25.6 \text{ mg} \sim 41.9 \text{ mg P}_2\text{O}_5 \text{ kg}^{-1}$ の範囲であった。このとき、オオムギの播種期や播種密度による有意な違いはなかった。また、播種期と播種密度の交互作用は有意ではなかった。この結果は、土壌中の可給態リン酸濃度はオオムギの播種期や播種密度と無関係であったことを示している。以降のすべての結果においてもオオムギ播種密度による違いは見られなかったため、播種密度の違いは反復として扱った。

ダイズ播種時のオオムギの地上部乾物重は、10月上旬、10月下旬、11月、3月、4月播種の順に、1246.8, 1006.3,

第1表 ダイズの収量と全重、莢数、整粒数、100粒重、整粒重/全粒重(実験1)。

	子実収量 (g m^{-2})	全重 (g m^{-2})	節数 (個体 $^{-1}$)	莢数 (個体 $^{-1}$)	整粒数 (個体 $^{-1}$)	100粒重 (g)	整粒重/全粒重
CF	295	722	13.6	62.8	77.8	28.3	0.795
CN	254	618	14.5	56.9	64.7	28.4	0.813
SF	176	515	13.2	56.2	57.2	25.9	0.645
SN	148	497	13.4	63.0	57.9	24.5	0.539
処理	**	**	**	ns	ns	**	***
施肥	ns	ns	*	ns	ns	ns	ns
処理×施肥	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns

略号はそれぞれ、CF(カバークロップ、秋施肥有り)、CN(カバークロップ、秋施肥無し)、SF(ダイズ単作、秋施肥有り)、SN(ダイズ単作、秋施肥無し)を示す。***, **, *はそれぞれ0.1%, 1%, 5%水準で有意な差があることを示す(二元配置分散分析による)。



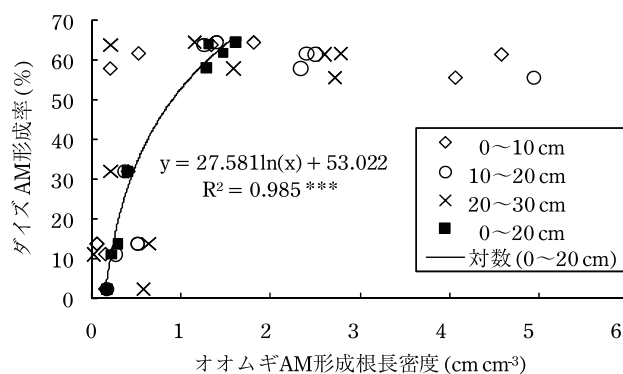
第3図 オオムギの深さ別根長密度 (A), AM 形成率 (B), AM 形成根長密度 (C) (実験2).

ダイズ播種時 (2006年5月26日) のオオムギの根系について調査した。棒線はそれぞれ、白抜きが0~10 cm, 灰色が10~20 cm, 黒塗りが20~30 cmの深さの根を示す。各図ともオオムギ播種期, 根の深さの二元配置分散分析を行った結果を挿入した。*, *** はそれぞれ5%, 0.1%水準で有意な差があることを示す。

457.5, 127.1, 29.3 g m^{-2} であった。Tukey 検定を行った結果, 10月上旬および10月下旬播種では他の播種期と比較し5%水準で有意に大きかった。

オオムギの根長密度は, 播種期に関わらず土壌深層部ほど有意に小さかった (第3図A)。また, オオムギは播種期が早いほど根系が発達し, 総根量が大きかった。オオムギのAM形成率は根長密度とは対照的に, 土壌深層部ほど有意に大きかった (第3図B)。しかし, 晩秋播きの11月播種では土壌の深さによる差は他の播種期ほど顕著ではなかった。また, 春播き (3月, 4月播種) に比べて秋播き (10月上旬, 10月下旬, 11月播種) の方が全体的にAM形成率は大きい傾向が見られた。AM形成根長密度は, 春播きよりも秋播きで大きい傾向にあった (第3図C)。秋播きの中でも10月上旬播種で最もAM形成根長密度は大きかった。根の深さとAM形成根長密度の関係は, 播種時期によって傾向が異なった。

この深さ別のオオムギAM形成根長密度とダイズAM形成率との関係を第4図に示した。いずれの深さにおいても,



第4図 オオムギAM形成根長密度とダイズAM形成率の関係 (実験2).

深さ別オオムギAM形成根長密度と播種後34日のダイズAM形成率の関係を示した。◇, ○, ×はそれぞれ, 深さ0~10 cm, 10~20 cm, 20~30 cmのオオムギのAM形成根長密度とダイズAM形成率の関係を示す。■は0~20 cmのオオムギのAM形成根長密度のうち2 cm cm^{-3} 以下の値とダイズのAM形成率の関係を示す。図中の曲線と式, R^2 値は, 0~20 cmのオオムギAM形成根長密度 (2 cm cm^{-3} 以下) とダイズのAM形成率との関係の対数回帰曲線とその式と R^2 値を示す。*** は回帰係数が0.1%水準で有意であることを示す。

第2表 ダイズ地上部リン含量および濃度 (実験2)。

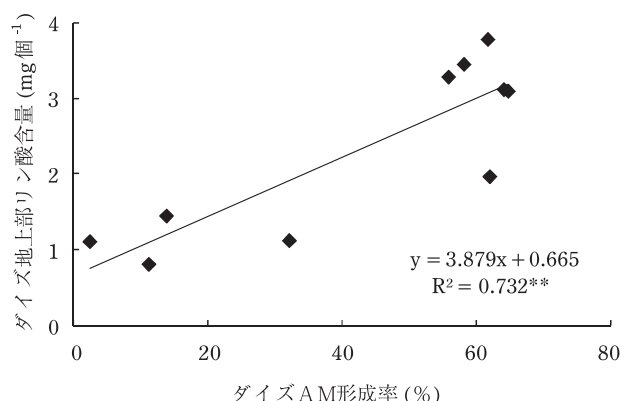
	オオムギ播種期				
	10月上旬	10月下旬	11月	3月	4月
ダイズ地上部リン含量 (mg 個体^{-1})	3.53	2.71	3.10	1.29	0.97
	a	abc	ab	bc	c
ダイズ地上部乾物重 (g 個体^{-1})	1.00	0.87	0.99	0.61	0.41
	ns				

同一のアルファベット間には5%水準で有意な差がないことを示す (一元配置分散分析に5%水準で有意差があったため, Tukey 検定を行った)。

オオムギAM形成根長密度が1 cm cm^{-3} 以上のとき, ダイズAM形成率は常に60%前後であった。一方, オオムギAM形成根長密度が1 cm cm^{-3} 以下のときは, ダイズAM形成率は0~65%の間で大きく異なった。深さ0~20 cmまでのオオムギAM形成根長密度を平均し, 2 cm cm^{-3} 以下の値についてダイズAM形成率との関係を示すと, 両者の間には正の関係があるように見えた。そこで, この関係を対数回帰したところ, $R^2=0.985$ の強い関係があった。

ダイズの地上部リン含量は0.97~3.53 mg 個体^{-1} であった (第2表)。これらは, オオムギ播種期が早いほど有意に大きかった。このとき調査した個体の乾物重は0.41~1.00 gであった。オオムギ播種期の違いによるダイズ乾物重の有意な差は見られなかったが, オオムギを春播きした区でダイズ乾物重は小さい傾向があった。

播種後34日のダイズAM形成率とダイズ地上部リン含量の関係には $R^2=0.732$ の正の相関があり, 1%水準で有意であった (第5図)。



第5図 ダイズのAM形成率とダイズ地上部リン含量の関係(実験2).
ダイズ播種後34日のAM形成率と地上部リン含量の関係を
示した. 図中の数式は回帰直線を示す. **は回帰係数が1%
水準で有意であることを示す(単回帰分析による).

考 察

1. カバークロップ栽培におけるダイズ収量とAM形成率

実験1では, Kobayashiら(2004)が示したように, 実際にオオムギカバークロップを利用した不耕起ダイズ栽培でダイズ単作区より収量が大きくなることを確認した(第1表). カバークロップ区で収量が大きくなった要因は, 全粒重に占める整粒重の割合が大きかったことと, 100粒重が大きかったことによった. すなわち, カバークロップ区では莢数は変わらないものの子実の肥大が良くなることによって収量が大きくなったと考えられる. カバークロップ区でこのように生育が旺盛で収量が増加した要因には, 雑草害の回避に加えてオオムギ残渣からの養分の供給や, オオムギ茎葉の刈り敷きに起因する根粒菌の活性維持が考えられる(小林ら2007)が, ここではAM形成が関与した可能性を検討する.

Boswellら(1998)の報告と同様に, カバークロップ処理によって主作物であるダイズのAM形成の促進が確認された(第2図). 実験を行った土壌の可給態リン酸濃度は, 施肥の有無, カバークロップの有無に関わらず, $16.1 \text{ mg} \sim 33.9 \text{ mg P}_2\text{O}_5 \text{ kg}^{-1}$ であった(トルオーグ法による). このとき, 施肥とカバークロップの交互作用は有意ではなかった. それゆえ, カバークロップ区においてダイズ単作区よりもAM形成が大きかったことは, 土壌のリン酸栄養の違いではなく, カバークロップ処理の有無に起因していると考えられた.

ダイズの収量はCF, CN, SF, SNの順に大きかった(第1表). ダイズの収量はカバークロップ処理により有意に大きくなったのに対して, 秋施肥の効果は有意ではなかった. 一方, ダイズのAM形成率はCN, CF, SN, SFの順に大きかった(第2図). ダイズのAM形成率もカバークロップ処理により有意に大きくなったのに対して, 秋施肥の効果は有意ではなかった. ダイズの収量, AM形成率の両方

がカバークロップ区においてダイズ単作区よりも有意に大きくなったことは, AM形成率の増加がダイズの生育促進の一因となった可能性を示している. また秋施肥が収量を増加させなかった(第1表)ことから, カバークロップ処理によるダイズの増収は, 秋にオオムギに施用した肥料が残っていたためではないことが明らかになった.

なお, 同年の福島拠点内における慣行栽培のダイズの収量は, 274 g m^{-2} であった. カバークロップ区の収量は秋施肥有り区で 295 g m^{-2} , 秋施肥なし区で 254 g m^{-2} であり(第1表), 慣行栽培と同等であった. 2001年から2003年の同等の試験においても, カバークロップ栽培は常に慣行栽培と同等かそれ以上の収量を上げている(小林ら2007).

2. オオムギの播種期の違いによるオオムギ根系及びAM分布の変化

実験1では, カバークロップ処理によってダイズのAM形成率が大きくなることが明らかになった. さらに実験2では, オオムギの播種期の違いによりオオムギのバイオマス及びAM形成根長密度は大きく異なっていた. これらの相違とダイズのAM形成率との関係を検討することで, オオムギAMがダイズAM形成に関与した可能性を考察する.

ダイズ播種時の土壌中の可給態リン酸濃度は $25.6 \text{ mg} \sim 41.9 \text{ mg P}_2\text{O}_5 \text{ kg}^{-1}$ の範囲であった. これは黒ボク土壌でダイズを栽培するのに適した範囲であった(亀和田ら1987).

オオムギの根系は播種期が早いほど大きく, 深く発達した(第3図A). これはオオムギの生育期間が長いほど, 根系がよく発達したためと考えられる. 3月播種では浅層の根が多く, 春先に急速に成長したことが推測できる.

AM形成率は, 根長密度とは対照的に土壌深層の根で大きかった(第3図B). オオムギの根長密度とオオムギのAM形成率の関係を土壌深度別に表してみると, 同じ根長密度であっても, 20~30 cmの層においてその他の層よりもAM形成率が大きかった(図は省略). すなわち土壌深層の根の方が, AMが形成されやすいと考えられた. また, 秋播きでは春播きに比べAM形成率が大きかった. その要因には, オオムギの栽培期間が長いことにより, 根の中で菌糸が成長しAMの形成が拡大すること, また自ら土中の孢子等の接種源を増やすこと, 長期間接種源にさらされたことなどが考えられる. 一方, オオムギ10月下旬播種では前後の播種期と比較して土壌0~10 cmのAM形成率が著しく小さかった. しかし, その原因は明らかではない.

根長密度にAM形成率を乗じた値であるAM形成根長密度は, 秋播きに比べて春播きで小さかった(第3図C). 春播きでAM形成根長密度が小さかったのは, 根長密度が小さかったこととAM形成率が小さかったことの両方による. 一方, 秋播きの中では10月上旬播種で最もAM形成根長密度は大きかった. 10月下旬播種では0~10 cmのAM形成率が小さかったため, その深さでのAM形成根長密度が小さかった. 播種期別にすべての深さのAM形成根

長密度を平均した値は、播種期が早いほど大きくなった。このことはオオムギ播種期を早めるほどダイズへの接種源としてのオオムギAM量が大きくなったことを示している。

3. オオムギの播種期の違いがダイズのAM形成とリン含量に及ぼす影響

オオムギAM形成根長密度の違いがダイズAM形成率、ダイズのリン含量及び濃度に与える影響を測定することで、オオムギのAM菌がダイズAM形成に働きかけた可能性を検討した。

オオムギAM形成根長密度とダイズAM形成率の関係は、いずれの深さにおいてもオオムギAM形成根長密度が 1 cm cm^{-3} 以下でダイズAM形成率が0~64%の間で大きく異なったのに対し、 1 cm cm^{-3} 以上のときは常に60%前後であった(第4図)。Ortaş (1996)はAM菌接種量が増えるほどAM形成率は増加するが、ある量以上ではAM形成率は頭打ちになることを報告している。第4図の結果は、オオムギAM形成根長密度が 1 cm cm^{-3} 以上のとき、ダイズのAM形成率は頭打ちになったことを示しているかもしれない。しかし、AM形成根長密度を構成しているAM形成率がある値以上では正しい指標とはなっていない可能性もある。今後、AM形成の度合いを含めたより詳細な測定法(Ohtomo and Saito 2005)や活性染色(Tisserant ら 1993)を用いれば、オオムギのAM形成根長密度とダイズAM形成率の関係性をより明らかにできるかもしれない。

この深さ別オオムギAM形成根長密度の0~30 cmの平均とダイズAM形成率との関係を対数回帰したところ、 $y = 0.195 \ln(x) + 0.451$, $R^2 = 0.723$ の1%水準で有意な関係があった。さらにこの関係性について、ダイズの根の深さを考慮し検討する。不耕起栽培のダイズの根は耕起栽培に比べて浅く、深さ20 cm以上の深層にはほとんど到達しない(Izumi ら 2004)。実際、播種後34日のダイズサンプリング時にはダイズの根の深さは15~20 cm程度であった。それゆえ、深さ0~20 cmのオオムギAMがダイズへのAM接種源として機能したと予想される。そこで、深さ0~20 cmのオオムギAM形成根長密度が 2 cm cm^{-3} 以下のときのダイズAM形成率との関係を対数回帰したところ、 $y = 27.581 \ln(x) + 53.022$, $R^2 = 0.985$ の0.1%水準で有意な強い関係があった(第4図)。この関係は、0~30 cmのオオムギAM形成根長密度との関係と比べて、さらに強いものであった。ゆえにダイズへのAM接種源として、オオムギAMの中でも深さ0~20 cmのダイズの根と直接接接触する部分が重要であると示唆される。

出芽した芽生えに最もすばやく感染するのは外生菌糸であることは一般的に受け入れられている(Read ら 1976)。と同時に外生菌糸はAM菌の土中の繁殖体の中で通常最も物理的攪乱に敏感であると考えられている(Evans and Miller 1988, 1990, McGonigle ら 1990)。磯部・坪木 (1999)

は冬作オオムギ後のインゲンマメ栽培では、オオムギによって冬の間AM菌が保持され、接種源として機能することを示唆した。カバークロップであるオオムギとダイズの作期が隣接しており、かつ耕起を挟まない本体系では、オオムギAMの外生菌糸が直接ダイズ幼植物の根に働きかけることができたと考えられた。また、本研究で用いたカバークロップ体系のオオムギは、単なる前作オオムギと異なり子実を収穫する前、茎葉が青い状態で刈り敷いてマルチとするため、ダイズ生育初期においてオオムギの地下部は生存したままである。それゆえ、より効果的なAM菌接種源として機能したかもしれない。

刈り敷いたオオムギは土壌水分や地温の保持に貢献すること、それらが分解され可給化する過程で土壌中の微生物層に影響を与えること、可給化した無機成分がダイズに供給されることなどが想像できる。これらの変化は間接的な要因としてダイズのAM形成に関与したかもしれない。Kobayashi ら (2004)はカバークロップ処理によって地温(深さ0.5 cm)の変動幅が小さくなることを報告している。一般的に低温下ではAM菌の根への定着は著しく悪く、温度が高いとAM菌の根への定着が促進される(鈴木 1986)。また、Walsh and Ragupathy (2007)は麦わらマルチによって土壌有機物含量が改善され、パパイヤのAM形成率が高まることを報告している。Karasawa ら (2000)は土壌水分が高い方がトウモロコシのAMの形成が促進されることを報告している。

カバークロップ栽培ではオオムギからのAM菌の受け渡しに加えて、オオムギマルチの存在もダイズAM形成を促進する要因となったと考えられる。オオムギの播種期が早いほど、オオムギの生育期間が長くなることによって地上部乾物重も大きくなった(実験2 結果)。すなわちオオムギ播種期が早いほど、地上を被覆するオオムギマルチの量が増えたとみなすことができる。オオムギ播種期の違いは、マルチの量の違いを通してダイズのAM形成に影響したかもしれない。しかし、このようなマルチの効果を実証するためには、刈り倒したオオムギ地上部を系外へ持ち出したマルチなしの処理区と比較検討する必要がある。

ダイズ地上部リン含量は早播きオオムギ後で晩播きオオムギの後よりも有意に大きかった(第2表)。また、ダイズAM形成率とダイズ地上部リン含量の間には、 $R^2 = 0.732$ (1%水準で有意)の正の関係があった(第5図)。この結果はダイズのAMがダイズ幼植物のリン酸栄養の改善に関与した可能性を示している。この結果から、オオムギのAM菌接種源としての役割を十分に発揮するためには、根の生育を十分に確保し、AMを形成させるために、オオムギの播種期は早い方が良いと考えられる。

4. カバークロップ体系におけるダイズ増収メカニズム

カバークロップによるダイズ増収のメカニズムには、雑草の抑制やオオムギ残渣からの養分供給に加えて、様々な

要因が関与していることが考えられる (小林ら 2007)。

本研究では、オオムギの AM 形成根長密度がダイズ AM 形成に寄与している可能性が示唆された (第 4 図)。また、ダイズ AM 形成率とダイズ地上部リン含量の間に正の相関関係がみられた (第 5 図)。これらの結果から、オオムギ AM 菌がダイズ AM 形成の促進を通じてダイズ幼植物のリン酸栄養を改善した可能性が考えられた。カバークロップ栽培において、土壌中の可給態窒素はオオムギに吸収された後、ダイズ播種時にはほとんど残っていないことを著者らは確認している。このような貧栄養は根粒形成にはプラスに働く一方、ダイズの初期生育には悪影響を及ぼすと考えられる。AM には宿主植物に対して、リン酸供給という機能のほかに、他の栄養分吸収や耐乾性の付与、病原菌への抵抗性の向上など様々な機能を持つことが示唆されている (Newsham ら 1995)。中でも AM は根粒着生を増加させる (Crush 1974)、根粒内リン酸濃度を高め、根粒活性を増加させる (佐藤ら 1998) ことが知られている (Barea ら 2005)。ダイズ AM の形成は、このような根粒菌との相互作用を通じて貧栄養状態での窒素固定を促進し、その結果ダイズの初期生育を促進するのに役立っているかもしれない。今後はカバークロップ処理が AM 菌、根粒菌、ダイズという三者の共存関係に及ぼす影響を検討する必要がある。

謝辞：本研究を遂行するにあたり、農業環境技術研究所の大場広輔博士には、アーバスキュラー菌根の観察法及び生態について、ご指導及びご助言を頂いた。中央農業総合研究センター関東東海水田輪作研究チーム渡邊好昭チーム長、作物研究所めん用小麦研究チーム小柳敦史チーム長には本稿の取りまとめにあたり、懇切なご指導を頂いた。また、東北農業研究センター業務第 4 科の職員の方々には圃場管理及びサンプル採取の際には多大なるご協力を頂いた。ここに記して深く感謝いたします。

引用文献

- Amijee, E., D.P. Stribley and P.W. Lane 1993. The susceptibility of roots to infection by an arbuscular mycorrhizal fungus in relation to age and phosphorus supply. *New Phytol.* 125 : 581–586.
- Arihara, J. and T. Karasawa 2000. Effect of previous crops on arbuscular mycorrhizal formation and growth of succeeding maize. *Soil Sci. Plant Nutr.* 46 : 43–51.
- Barea, J., M. J. Pozo, R. Azcón and C. Azcón-Aguilar 2005. Microbial co-operation in the rhizosphere. *J. Exp. Bot.* 56 : 1761–1778.
- Boswell, E.P., R.T. Koide, D.L. Shumway and H.D. Addy 1998. Winter wheat cover cropping, VA mycorrhizal fungi and maize growth and yield. *Agric. Ecosyst. Environ.* 67 : 55–65.
- Crush, J.R. 1974. Plant growth responses to vesicular-arbuscular mycorrhiza. VII. Growth and nodulation of some herbage legumes. *New Phytol.* 73 : 743–749.
- Dodd, J.C. and P. Jeffries 1986. Early development of vesicular-arbuscular mycorrhizas in autumn sown cereals. *Soil Biol. Biochem.* 8 : 149–154.
- Evans, D.G. and M.H. Miller 1988. Vesicular-arbuscular mycorrhizas and the soil-disturbance-induced reduction of nutrient absorption in maize : I. Casual relations. *New Phytol.* 110 : 67–74.
- Evans, D.G. and M.H. Miller 1990. The role of the extra-radical mycelial network in the effect of soil disturbance upon vesicular-arbuscular mycorrhizal colonization of maize. *New Phytol.* 114 : 65–71.
- 磯部勝孝・坪木良雄 1999. 冬作物の導入がアーバスキュラー菌根菌の密度と後作インゲンマメの生育におよぼす影響. *日作紀* 68 : 118–125.
- Izumi, Y., K. Uchida and M. Iijima 2004. Crop production in successive wheat-soybean rotation with no-tillage practice in relation to the root system development. *Plant Prod. Sci.* 7 : 329–336.
- Karasawa, T., J. Arihara and Y. Kasahara 2000. Effects of previous crops on arbuscular mycorrhizal formation and growth of maize under various soil moisture conditions. *Soil Sci. Plant Nutr.* 46 : 53–60.
- Karasawa, T., Y. Kasahara and M. Tanabe 2001. Variable response of growth and arbuscular mycorrhizal colonization of maize plants to preceding crops in various types of soils. *Biol. Fertil. Soils* 33 : 286–293.
- Karasawa, T., Y. Kasahara and M. Tanabe 2002. Differences in growth responses of maize to preceding cropping caused by fluctuation in the population of indigenous arbuscular mycorrhizal fungi. *Soil Biol. Biochem.* 34 : 851–857.
- 亀和田國彦・岩崎秀穂・粕谷光正・佐藤文政 1987. 黒ボク土における土壌中リン酸と作物の生育に関する研究 (第 1 報) 作物生育に対する可給態リン酸濃度勾配の影響. *栃木農試報* 33 : 561–565.
- Kobayashi, H., S. Miura and A. Oyanagi 2004. Effects of winter barley as a cover crop on the weed vegetation in a no-tillage soybean. *Weed Biol. Manag.* 4 : 195–205.
- 小林浩幸・小柳敦史 2005. 冬作オオムギをカバークロップとして用いた不耕起ダイズ栽培において狭畦化と除草処理が雑草量とダイズの収量に及ぼす影響. *雑草研究* 50 : 284–291.
- 小林浩幸・内田智子・島崎由美 2007. 前作大麦のカバークロップ効果でダイズが増収. *農と園* 82 : 1267–1272.
- McGonigle, T.P., M.H. Miller, D.G. Evans, G.L. Fairchild and J.A. Swan 1990. A new method which gives an objective measure of colonization of roots by vesicular-arbuscular mycorrhizal fungi. *New Phytol.* 115 : 495–501.
- Murakami, T., K. Yamada and S. Yoshida 1999. Improved method for easy and rapid determination of root length of vegetables. *Soil Sci. Plant Nutr.* 45 : 471–478.
- Murphy, J. and J. P. Riley 1962. A modified single solution method for the determination of phosphate in natural waters. *Anal. Chim. Acta.* 27 : 31–36.
- Newsham, K.K., A.H. Fitter and A.R. Watkinson 1995. Multifunctionality and biodiversity in arbuscular mycorrhizas. *Trends Ecol. Evol.* 10 : 407–411.
- 大場広輔・斎藤勝晴・藤吉正明 2006. アーバスキュラー菌根実験法 (2) アーバスキュラー菌根の観察. *土と微生物* 60 : 57–61.
- Ohtomo, R. and M. Saito 2005. Polyphosphate dynamics in mycorrhizal roots during colonization of an arbuscular mycorrhizal fungus. *New Phytol.* 167 : 571–578.
- Ortaş, İ. 1996. The influence of use of different rates of mycorrhizal

- inoculum on root infection, plant growth, and phosphorus uptake. Commun. Soil Sci. Plant Anal. 27 : 2935 – 2946.
- Read, D. J., H. K. Koucheki and J. Hodgson 1976. Vesicular-arbuscular mycorrhizas in natural vegetation systems : I. The occurrence of infection. New Phytol. 77 : 641 – 653.
- 佐藤喬・久米民和・平田熙 1998. 黒ボク心土を用いた異なる施肥レベル下での大豆の生育と根粒活性に及ぼすVA菌根菌接種の影響. 土肥誌 69 : 62 – 72.
- 鈴木達彦 1986. VA菌根に関する諸問題 [3]. 農及園 61 : 1373 – 1378.
- Tisserant, B., V. Gianinazzepearson, S. Gianinazzi and A. Golotte 1993. In planta histochemical staining of fungal alkaline-phosphatase activity for analysis of efficient arbuscular mycorrhizal infections. Mycol. Res. 97 : 245 – 250.
- 臼木一英・山本泰由 2003. 温暖地における畑作付体系の違いがアーバスキュラー菌根菌の密度と後作物の生育・収量に及ぼす影響. 日作紀 72 : 158 – 162.
- Walsh, K. B. and S. Ragupathy 2007. Mycorrhizal colonization of three hybrid papayas (*Carica papaya*) under mulched and bare ground conditions. Aust. J. Exp. Agric. 47 : 81 – 85.
- Yano, K., A. Yamauchi and Y. Kono 1996. Distribution of arbuscular mycorrhizas in peanut root system. Jpn. J. Crop Sci. 65 : 315 – 323.
- 矢野勝也 2006. 植物とVA菌根菌の窒素をめぐる駆け引き. 根の研究 15 : 11 – 17.

Winter Barley as a Cover Crop Affects the Arbuscular Mycorrhizal Colonization of No-Tillage Soybeans : Yumi SHIMAZAKI¹⁾, Tomoko UCHIDA²⁾ and Hiroyuki KOBAYASHI²⁾ (¹⁾National Agricultural Research Center 3-1-1 Kannondai, Tsukuba, Ibaraki, 305-8666 Japan ; ²⁾National Agricultural Research Center for Tohoku Region)

Abstract : No-tillage soybean culture using winter barley as a cover crop was developed to control annual summer weeds and reduce labor. With this cover crop system, the soybean yield is higher than with a non-cover crop system, although the mechanism is not clear. One factor of the mechanism is suggested to be the nitrogenous supply from barley residual. This research examined the relationship between the arbuscular mycorrhizal (AM) colonization of barley and soybean. The AM colonization of soybean became greater with the cover crop system. The root length density and the AM colonization of barley became greater when the barley was sown earlier. The AM colonization of deep roots was greater than that of shallow roots. As the barley sowing time became earlier, the AM-colonized root length density of barley, which was derived by multiplying the root length density by the AM colonization rate, became greater. There was a significant correlation between the AM colonization of soybean and the AM-colonized root length of barley at a depth of 0~20 cm. These results suggest that the AM fungi at a depth of 0~20 cm affect the AM colonization of soybean acting as AM fungi inocula.

Key words : Arbuscular mycorrhiza, Barley, Cover crop, Soybean.
