

圃場条件下における土壌硬度の違いが根粒超着生ダイズ 品種作系4号の生育および収量に及ぼす影響

島村聡¹⁾・高橋幹²⁾・野原努³⁾・中村卓司¹⁾・中山則和¹⁾・山本亮¹⁾・金栄厚¹⁾・島田信二¹⁾

(¹⁾作物研究所, ²⁾国際農林水産業研究センター, ³⁾筑波大学農林学系)

要旨: 根粒超着生ダイズ品種「作系4号」は、耕起栽培よりも不耕起栽培において安定して多収を示すことが明らかになっている。この原因として作系4号では根粒が多量に着生するために、根系が小さくて、土壌乾燥ストレスに弱いことが想定される。そこで、その要因解明の一環として、不耕起条件のモデルとして土壌鎮圧処理を行い、土壌硬度が異なる圃場で栽培したときの作系4号と親品種エンレイの生理・生態的特性を比較解析した。その結果、作系4号は、鎮圧区、非鎮圧区の両方において根の発達程度がエンレイより劣り乾燥ストレスを受けやすい状態であったが、鎮圧区では非鎮圧区より出液速度および気孔コンダクタンスは高く、土壌の鎮圧処理により乾燥ストレスが緩和された。作系4号では、鎮圧区の地上部乾物重は生育初期から非鎮圧区に比べて高く、鎮圧区の収量は2003年、2004年ともに非鎮圧区より 50 g m^{-2} 以上高まって約 $360\sim 380 \text{ g m}^{-2}$ であり、鎮圧処理効果に1%水準で有意性が認められた。一方、エンレイでは同様の効果は認められなかった。作系4号は根の発達がエンレイより劣るために土壌の乾燥ストレスを受けやすくなるが、鎮圧処理により土壌体積含水率が高まると根からの吸水性が改善されて乾燥ストレスが緩和され、その結果、作系4号の物質生産能力が高まり子実収量が向上したと考えられた。

キーワード: 乾燥ストレス, 根粒超着生ダイズ, 根量, 作系4号, 収量, 生育, 土壌硬度, 土壌水分。

ダイズ種子のタンパク質含有率は40%程度と他の作物に比べて極めて高いので、子実生産のために多量の窒素を必要とし、収量向上のためには窒素集積量を高めることが重要である(桑原1986)。この窒素源には土壌に含まれる窒素と根粒で固定された窒素があり、各供給源からの窒素量を高めることで収量向上が期待できる。しかしながら、施肥の多用は根粒着生と窒素固定活性を抑制し(McClure and Israel 1979, 松本ら1982, Vesseyら1988)、増収に結びつかないことが多い。従って、ダイズと共生関係を持つ根粒菌の窒素固定機能を最大限に活用することは、ダイズ生産を向上させる有効な手法と考えられる。そこで、根粒が多量に着生する品種は高い窒素固定能力を有して多収になるのではないかと期待して人為的突然変異によって根粒超着生系統が育成されたが、それらの生育・収量は親品種より劣ったために、農業的価値がないとされている(Wu and Hrapner 1991, Prachtら1994, Songら1995, Zhaoら1998)。根粒超着生系統の生育・収量が劣る要因は、根粒形成および窒素固定に光合成産物が多量に消費されるためであるが、根の発達が抑制されて養水分の吸収が不利になることも指摘されている(Ohyamaら1993)。

わが国では農業生物資源研究所において、ダイズ品種エンレイをメチルエタンスルホン酸で処理して突然変異を誘発し、根粒超着生系統En6500が作出された(Akao and Kouchi 1992)。この系統の生育、収量および子実品質はエンレイより極めて劣ったことから、農業研究センター(現・作物研究所)において、これら不良形質の改良を目的としてエンレイへの戻し交配を行い、後代に品種タマホマレが自然交雑した個体を選抜・固定して根粒超着生品種「作系

4号(現・関東100号(平成17年12月種苗法による品種登録済み))」が育成された(Takahashiら2003, 高橋ら2003a, 山本ら2004)。本品種も、耕起条件では生育・収量が顕著に抑制されることが観察されている。根粒超着生系統の根量が親品種より劣ることが報告されているように(Dayら1987, Gremaud and Harper 1989, Ohyamaら1993)、作系4号についてもポット試験では根量は小さく(Takahashiら2005a, b)、これが乾燥ストレスを受けやすくしている一因と指摘されている。しかし、作系4号は不耕起栽培すると生育・収量の改善することが認められ(高橋ら2004)、その理由として、不耕起栽培では土壌表層の土壌硬度がやや高く土壌水分が高く維持されるためであると想定された。すなわち、作系4号は土壌乾燥に弱い傾向にあることから、土壌表層の乾燥化を促進する耕起や中耕培土は作系4号の栽培に不利な条件で、逆に土壌水分が保持されやすい不耕起は適した条件と考えられた(高橋ら2004)。

このように作系4号の特性を理解し、これに対応した栽培法を導入することで、根粒超着生品種においても安定的に収量が得られる可能性があると考えられる。しかし作系4号の乾燥ストレスに関して、圃場条件下における土壌水分と生理・生態的特性との関係については十分に明らかにされていない。そこで本研究では、作系4号の生育・収量の一層の安定化を図るため、不耕起条件のモデルとして土壌硬度が異なる圃場で栽培したときの生理・生態的特性を検討した。

材料と方法

1. 試験区の設定と栽培条件

実験は2003年および2004年につくば市の作物研究所内畑圃場(淡色黒ボク土)で行い、ダイズ品種としてエンレイおよび作系4号を供試した。施肥量は $N-P_2O_5-K_2O:3-10-10\text{ kg}/10\text{ a}$ とし、ロータリー耕起前に化成肥料を施与した。試験区として、ロータリー耕起後にそのままの非鎮圧区およびトラクタ(重さ約3トン)で圃場を均一に走行することにより土壤表面を踏み固めた鎮圧区を、播種前日に設定した。鎮圧処理後に土壤硬度を貫入式土壤硬度計(DIK-5521, 大起理化学工業製)で表層~地下20 cm間の平均値として測定したところ、非鎮圧区では0.64(2003年)と0.61(2004年)MPaで、鎮圧区では1.73(2003年)と1.22(2004年)MPaであった。栽植条件は条間70 cm, 株間10 cmで、2003年6月16日および2004年6月11日に1株3粒播種し、初生葉展開後に1本立て(14.3株/ m^2)に仕立てた。各反復の面積は46.2 m^2 (2003年; 3反復, 2004年; 5反復)とした。いずれの区においても無中耕, 無培土で栽培し, 他の管理作業は慣行に準じた。

2. 地下部関連形質の測定

土壤水分センサー(2003年; Hydrosense, Campbell Scientific製, 挿入式瞬時測定型, 表層~地下12 cm間, 2004年; EC-20, Decagon製, 埋設式連続測定型, 表層~地下20 cm間)で生育期間中の圃場の土壤体積含水率を計測した。また2003年7月15日および29日に株直下および株から条間方向15 cmの2地点を中心とした直径9.5 cm, 長さ20 cmの円筒コアを電動サンプラー・手押式(ES-30, 藤原製作所製)で1反復につき各地点2本を採取し, 根を洗い出して根長(根粒を除く)をルートスキャナー(Commonwealth Aircraft製)で測定した。その後, 80°Cで48時間以上風乾して根および根粒の乾物重を測定した。

3. 地上部関連形質の測定

地上部生育調査には1反復につき16株を供試し, 80°Cで48時間以上風乾して乾物重を測定した。また2004年8月18日に自然光条件下で上位完全展開第2葉における光合成速度および気孔コンダクタンスを光合成・蒸散測定装置(LI-6400, LI-COR製)で各区につき6株を測定した。収量調査には1反復につき2003年は21株, 2004年は16株(連続した健全株・作系4号のみ)および4.2 m^2 坪刈り(2.8 m \times 1.5 m, 60株分)を供試し, 粗子実収量(15%水分換算)を測定した。

4. 出液速度の測定

出液の採取には1反復につき10株を供試し, 子葉節と初生葉節間の茎を切断して切り口に脱脂綿を詰めたプラスチックチューブを載せて出液を採取した。出液の採取前と採取後のチューブの重量を測定し, その差を出液量とした。なお, 切り口から液が出始める時間が個体により異なるため, 最初の5~10分間に捨てた液を捨て, その後の出液を採取した。また午前中に液の採取を行い, 各個体の出液採取は90分以内に終了した。

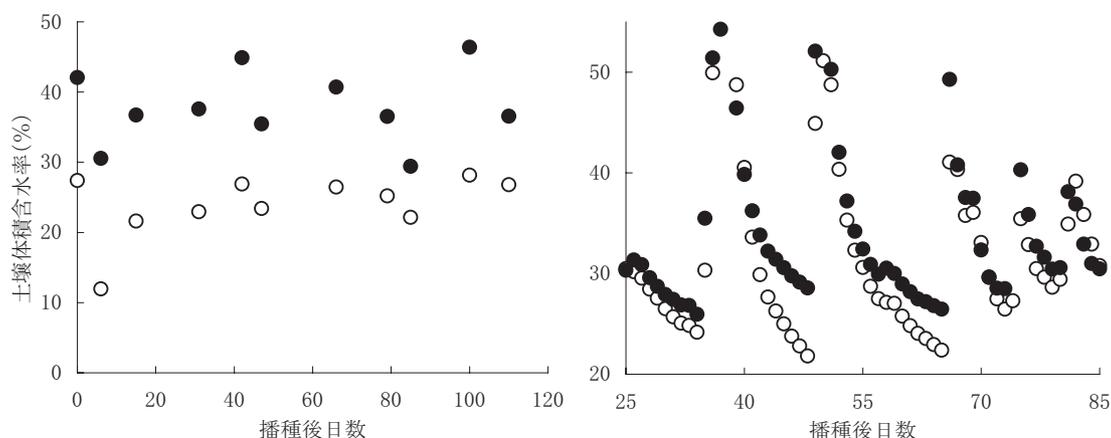
結 果

1. 圃場の土壤体積含水率の推移

土壤硬度と土壤体積含水率との関係(第1図)において, ダイズ生育期間の平均含水率は2003年では非鎮圧区23.4%に対し, 鎮圧区37.9%で, 常に非鎮圧区より鎮圧区で高かった。2004年では降雨時の測定値が含まれるために平均値は非鎮圧区32.2%に対し, 鎮圧区34.9%でわずかに高い傾向にあったが, 播種後35日および49日の降雨後, 5日以上経過した状況では鎮圧区の含水率は非鎮圧区よりも明らかに高かった。

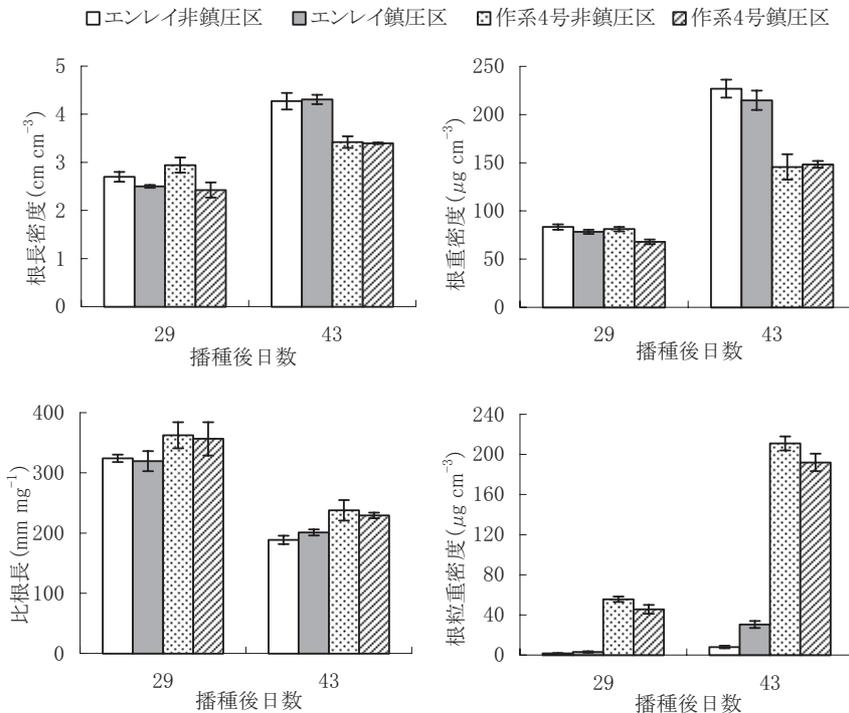
2. 根の発達程度と根粒着生量

地下部関連形質を第2図に示した。エンレイ, 作系4号

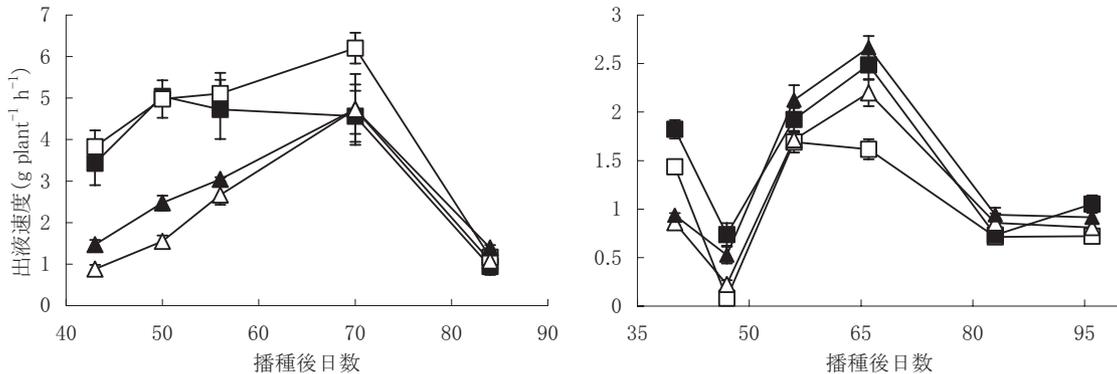


第1図 土壤鎮圧処理が土壤体積含水率に及ぼす影響。

○:非鎮圧区, ●:鎮圧区。左:2003年, 右:2004年。



第2図 土壌鎮圧処理が地下部関連形質に及ぼす影響(2003年).
 平均値±標準誤差(n=3).



第3図 土壌鎮圧処理が出液速度に及ぼす影響.

□:エンレイ非鎮圧区, ■:エンレイ鎮圧区, △:作系4号非鎮圧区, ▲:作系4号鎮圧区.
 平均値±標準誤差, 左:2003年(n=3), 右:2004年(n=5).

ともに土壌を鎮圧した条件下では播種後29日目の根長密度および根重密度(土壌1 cm³あたりの根長および根乾物重)はやや小さかったが, 43日目には鎮圧による影響は認められなかった. 各品種の平均値でみると, 播種後29日目では作系4号の根長密度はエンレイと比べてほぼ同程度で根重密度はわずかに小さい程度であった. ところが播種後43日目では, 根長密度はエンレイの4.3 cm cm⁻³に対して作系4号では3.4 cm cm⁻³であり, 根重密度はエンレイの221 μg cm⁻³に対して作系4号では147 μg cm⁻³で, 作系4号の根の発達程度を示す各指標はエンレイより明らかに劣っていた. 比根長(根乾物重1 mgあたりの根長)はいずれの調査日においても作系4号がエンレイより高い傾向にあり, 作系4号の根は細根が多いことが示された.

また作系4号の根粒着生量は多く, 根粒重密度(土壌1 cm³あたりの根粒乾物重)はエンレイの6倍以上であった.

3. 出液速度および光合成速度

播種後60日までの出液速度の推移をみると, 2003年のエンレイでは非鎮圧区が鎮圧区よりも僅かに高い推移を示したのに対して, 作系4号では非鎮圧区より鎮圧区で高い傾向にあった(第3図). 一方2004年では, 両品種とも出液速度は鎮圧区が非鎮圧区より高かった. いずれの年も播種後80日以降になると各品種の出液速度は急激に低下して, 品種間および鎮圧処理間で差異は認められなくなった.

2004年における光合成速度と気孔コンダクタンスを第1表に示した. エンレイでは両形質とも鎮圧処理間に5%水

第1表 みかけの光合成速度, 気孔コンダクタンスに及ぼす品種, 鎮圧処理の影響(2004年).

品種および試験区	光合成速度 ($\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$)	気孔コンダクタンス ($\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$)
エンレイ非鎮圧区	23.3 ± 1.37	0.938 ± 0.085
エンレイ鎮圧区	24.3 ± 0.91	0.980 ± 0.048
作系4号非鎮圧区	26.4 ± 0.99	0.760 ± 0.025
作系4号鎮圧区	27.3 ± 1.50	0.901 ± 0.022

平均値±標準誤差(n=6).

品種内で**は1%水準で有意差があることを, nsは5%水準で有意差がないことを示す.

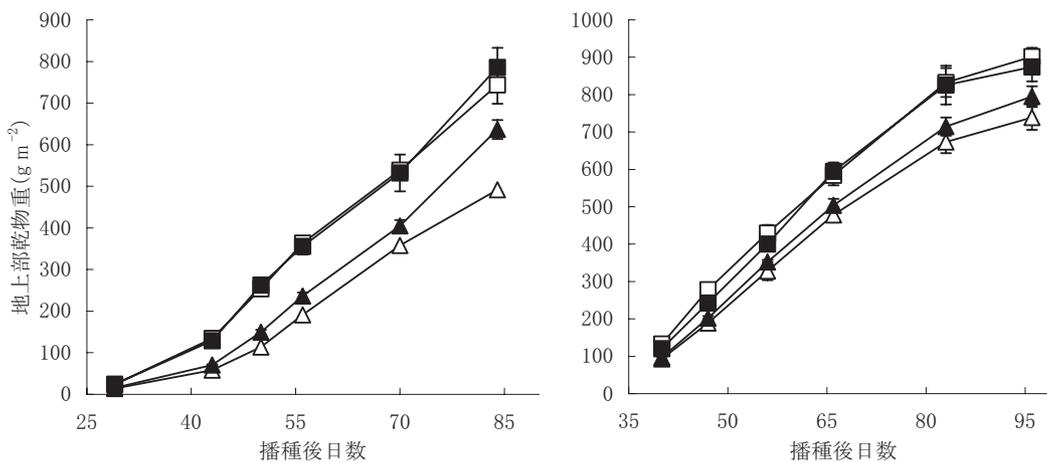
準で有意差は認められなかった. これに対して作系4号では, 光合成速度については鎮圧処理間で5%水準で有意差は認められなかったが, 鎮圧区の気孔コンダクタンスは非

鎮圧区より約 $0.14 \text{ mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ 高く, 1%水準で有意差が認められた.

4. 地上部乾物重の推移と粗子実収量

第4図には地上部乾物重の推移を示した. 各試験年においてエンレイの乾物重の推移には非鎮圧区, 鎮圧区ともに大きな差はみられなかった. 一方, 作系4号は, 鎮圧区の地上部乾物重は播種後30日前後から非鎮圧区に比べて高く推移し, 生育期間の最終日では2003年で29%, 2004年で7.5%高かった.

第2表には粗子実収量を, 第3表には粗子実収量に関する分散分析の結果を示した. まずエンレイの収量についてみると, 2003年では鎮圧区では約 40 g m^{-2} 高く 386.8 g



第4図 土壌鎮圧処理が地上部乾物重に及ぼす影響.

□:エンレイ非鎮圧区, ■:エンレイ鎮圧区, △:作系4号非鎮圧区, ▲:作系4号鎮圧区.
平均値±標準誤差, 左:2003年(n=3), 右:2004年(n=5).

第2表 粗子実収量および黒根腐病罹病率に及ぼす品種, 鎮圧処理の影響.

試験年	品種および試験区	粗子実収量(g m^{-2})		罹病率* (%)
		16又は21健全株	4.2m ² 坪刈り	
2003年	エンレイ非鎮圧区	—	343.4 ± 9.1	3.3
	エンレイ鎮圧区	—	386.8 ± 10.9	4.4
	作系4号非鎮圧区	305.6 ± 3.7	183.2 ± 60.5	53.3
	作系4号鎮圧区	386.0 ± 14.5	258.5 ± 33.7	49.4
2004年	エンレイ非鎮圧区	—	367.5 ± 16.5	0.0
	エンレイ鎮圧区	—	373.4 ± 10.4	0.0
	作系4号非鎮圧区	302.9 ± 12.3	290.9 ± 12.9	30.0
	作系4号鎮圧区	359.8 ± 23.2	322.2 ± 10.7	23.3

平均値±標準誤差(2003年n=3, 2004年n=5).

*:60株中のダイズ黒根腐病の罹病率.

第3表 粗子実収量に関する分散分析.

要因	エンレイ			作系4号		
	自由度	平均平方	F値	自由度	平均平方	F値
鎮圧処理(T)	1	2274.3	3.093ns	1	17662.8	14.046**
年次(Y)	1	106.9	0.145ns	1	783.0	0.623ns
交互作用(T×Y)	1	1312.3	1.784ns	1	519.5	0.413ns
誤差	12	735.4		12	1257.5	

**は1%水準で有意差があることを, nsは5%水準で有意差がないことを示す.

m^{-2} であったが、2004年では両区とも 370 g m^{-2} 程度であった。しかし、収量に対する鎮圧処理、年次および交互作用の有意差は5%水準で認められなかった。一方、作系4号の坪刈り収量をみると、鎮圧区は非鎮圧区より2003年で 75 g m^{-2} 、2004年で 31 g m^{-2} 高かった。しかしながら、生育後期に黒根腐病菌 (*Colonectria ilicicola* Boedijn and Reitzma) による罹病株が多く見られ、坪刈りで評価した場合には収量への影響が大きかったことから、連続した健全株で評価することにした。この場合においても、鎮圧区の収量は2カ年とも非鎮圧区より 50 g m^{-2} 以上高く約 $360 \sim 380 \text{ g m}^{-2}$ であり、鎮圧処理には1%水準で有意差が認められ、年次および交互作用には5%水準で認められなかった。なお、作系4号の収量(健全株)はエンレイ(坪刈り)と比較して2003年、2004年それぞれ鎮圧区で0.8、13.6 g m^{-2} 、非鎮圧区で37.8、64.6 g m^{-2} 低かった。

考 察

作系4号を含む根粒超着生系統は根量が親品種より劣り (Dayら1987, Gremaud and Harper 1989, Ohyamaら1993, Takahashiら2005a, b)、土壌からの水分吸収が不利であるために (Ohyamaら1993)、乾燥ストレスを受けやすいとされている。そのため、作系4号は土壌の乾燥化が比較的進みにくいマルチ栽培 (高橋ら2003a) や不耕起栽培 (高橋ら2004) のような条件下では生育・収量が高まっている。また、ポット試験のように根域が制限されている条件下では十分な灌水が可能であるために作系4号の耐乾性はエンレイと比較して必ずしも弱くないと報告されている (高橋ら2003b)。このように、作系4号の栽培には根圏の土壌水分の高低が大きく関与していることは明らかである。一般に、不耕起条件下の土壌水分は耕起条件下よりも高いとされているが、本研究においても不耕起条件のモデルとして土壌を鎮圧した条件では耕起した状態の非鎮圧条件より土壌体積含水率は明らかに高く (第1図)、作系4号の栽培に適していることが示された。そこで土壌鎮圧による含水率の高低と作系4号の生理・生態的特性との関係について検討し、本品種の特徴が発揮される栽培・環境条件を考察した。

作系4号の根の発達程度は播種後29日目ではエンレイとほぼ同程度であったが、43日目には明らかに劣っていた (第2図)。従って、作系4号は比較的土壌水分の高い深層の根の発達が不十分で吸水が困難であることが推測される。乾燥ストレスは生育の抑制の他に落花・落莢を促し、収量に影響を及ぼすことがあるが、根の発達程度に差異がみられたこの時期は開花期1週間前であり、作系4号はその影響を受けやすい状態であったと考えられる。前川ら (2003) によれば、光合成速度は乾燥ストレス下ではエンレイよりも大幅に減少する傾向が見られた、としている。本研究では光合成測定前1週間に41 mmの降雨があり土壌水分に比較的恵まれていたため、作系4号の光合成速度

には処理間で有意差がみられなかった (第1表)。しかしながら、根の発達は非鎮圧区と鎮圧区では同程度でありながら (第2図)、鎮圧区の出液速度は播種後60日程度までは非鎮圧区より高かったことから (第3図)、土壌上層の土壌含水率が高まったことで根の吸水性が改善されたことが考えられる。これにより根粒窒素固定能が向上して、植物体への窒素集積が高まったことも予想される。また、生育中期において鎮圧区では気孔コンダクタンスは有意に高まり (第1表)、乾燥ストレスが緩和されていたことが示唆された。このように、鎮圧区ではストレスに対して生理的な改善がみられたために地上部乾物重は生育初期から高まって (第4図)、非鎮圧区に比べて 50 g m^{-2} 以上の収量増加に至ったと推測される (第2表、第3表)。従って、作系4号は根粒の超着生形質と引き替えに根系の発達が劣るために基本的に耐乾性が弱いと考えられる。

一方エンレイでは、根の発達は非鎮圧区、鎮圧区ともに同程度であったが (第2図)、鎮圧区の出液速度は2003年では非鎮圧区と同等か低い場合があり、2004年では逆に高く、年次によって傾向が異なっていた (第3図)。しかしながら鎮圧区では、2004年の出液速度は非鎮圧区に対して高かったが、光合成速度および気孔コンダクタンスには両区間に有意差は認められなかったことから (第1表)、作系4号とは異なり乾燥ストレスの影響を受けていないことが推測される。従って、地上部乾物重の推移には両区で大きな差異がみられず (第4図)、鎮圧処理による収量への効果もなかったと考えられる (第2表、第3表)。

辻ら (1995) は、淡色黒ボク土の不耕起条件下では耕起条件下よりもダイズやトウモロコシの初期生育が促進されると報告している。不耕起条件は土壌水分の保持力の増加の他に、耕起条件に比べて土壌表層の水分や温度の変動が緩やかであること、生育初期には作物の養分吸収に有利であることが要因であると考えられている (辻1998)。鎮圧条件下で作系4号の生育・収量が改善されたが、これは土壌水分の増加の他に栽培に有利な条件であった可能性も考えられる。また、土壌硬度について、鎮圧区は2003年は非鎮圧区の約3倍で、2004年は約2倍であったが、これは鎮圧時の土壌水分の違いが影響した可能性がある。しかし、エンレイ、作系4号ともに収量への年次効果は有意に認められなかったことから (第3表)、鎮圧の程度による影響はなかったと考えられる。一般に普通畑の淡色黒ボク土は通気性が良いために過剰な鎮圧処理を行ってもダイズの生育に負の影響が認められなかった可能性があるが、水田土壌では鎮圧により固相率が顕著に高まって通気性が低下し、根の生育が悪くなる恐れがあることから、水田転換畑における作系4号の栽培には土壌水分と通気性を適度に維持できる土壌硬度が重要になるだろう。

ところで高橋 (2005) は、水田転換畑における作系4号とエンレイの収量性の比較では、耕起・中耕・培土による慣行栽培ではエンレイに比べて18%少ない 254 kg/10 a の

収量であったが、畦間 30 cm の不耕起・狭畦・密植栽培と窒素 13~15 kg/10 a の多肥を伴った条件下ではエンレイに比べて 17% 増の 389 kg/10 a の収量を得たとしている。本研究ではエンレイより多収にはならなかったが、その要因として狭畦・密植栽培ではなく、窒素多肥もおこなっていないので作系 4 号の能力を十分には発揮できていなかった可能性がある。また、ダイズ黒根腐病の被害程度は根粒着生程度により異なり、根粒超着生系統が非常に高く、次いで普通品種、根粒非着生系統の順であることが知られているように (Tazawa ら 2001)、本研究においても罹病程度はエンレイよりも作系 4 号で顕著に高かった。このように、黒根腐病が多発する圃場で実施しており、外観から罹病株を除外して作系 4 号の収量を算出しているが (第 2 表)、健全に見えてもその影響を受けている可能性もある。

以上のように、作系 4 号は親品種であるエンレイと比べて生理・生態的に耐乾性が弱い、土壌硬度が高まって土壌体積含水率が高まると根からの吸水性が改善されて、乾燥ストレスが緩和されることが明らかになった。これら生理的な改善は、生育期間中の地上部乾物重が高まり、子実収量が向上した要因であると考えられる。これまで作系 4 号は耕起による慣行栽培では低収性とされていたが、生理・生態的特性、特に土壌水分に配慮した栽培・環境条件を設定することで生育や収量が向上することが示唆された。

謝辞：本研究の遂行にあたり、緑資源機構の大矢徹治博士、山形県立農業試験場の相澤直樹研究員および新潟県農業総合研究所の服部誠研究員に御協力をいただきました。心から感謝いたします。

引用文献

- Akao, S. and H. Kouchi 1992. A supernodulating mutant isolated from soybean cultivar Enrei. *Soil Sci. Plant Nutr.* 38 : 183–187.
- Day, D.A., G.D. Price, K.A. Schuller and P.M. Gresshoff 1987. Nodule physiology of a supernodulating soybean mutant. *Aust. J. Plant Physiol.* 14 : 527–538.
- Gremaud, M.F. and J.E. Harper 1989. Selection and initial characterization of partially nitrate tolerant nodulation mutants of soybean. *Plant Physiol.* 89 : 169–173.
- 桑原真人 1986. ダイズの多収条件と窒素代謝 (1). *農及園* 61 : 473–476.
- 前川富也・松波寿典・大木行彦・国分牧衛 2003. 根粒超着生ダイズ作系 4 号の光合成特性. *日作紀 (別 1)* 72 : 332–333.
- 松本重男・松永亮一・古屋忠彦・益山剛 1982. ダイズの栽培種と野生種との肥料反応性の比較. *日作紀* 52 : 293–300.
- McClure, P.R. and D.W. Israel 1979. Transport of nitrogen in the xylem of soybean plants. *Plant Physiol.* 64 : 411–416.
- Ohyama, T., J.C. Nicholas and J.E. Harper 1993. Assimilation of $^{15}\text{N}_2$ and $^{15}\text{NO}_3^-$ by partially nitrate-tolerant nodulation mutants of soybean. *J. Exp. Bot.* 44 : 1739–1747.
- Pracht, J.E., C.D. Nickell, J.E. Harper and D.G. Bullock 1994. Agronomic evaluation of nonnodulating and hypernodulating mutants of soybean. *Crop Sci.* 34 : 738–740.
- Song, L., B.J. Carroll, P.M. Gresshoff and D.F. Herridge 1995. Field assessment of supernodulating genotypes of soybean for yield, N_2 fixation and benefit to subsequent crops. *Soil Biol. Biochem.* 27 : 563–569.
- Takahashi, M., J. Arihara, N. Nakayama and M. Kokubun 2003. Characteristics of growth and yield formation in the improved genotype of supernodulating soybean (*Glycine max* L. Merr.). *Plant Prod. Sci.* 6 : 112–118.
- 高橋幹・有原文二・中山則和・国分牧衛・島田信二・高橋浩司・羽鹿牧太 2003a. 根粒超着生ダイズ品種「作系 4 号」の育成. *作物研報* 4 : 17–28.
- 高橋幹・中山則和・金栄厚・野原努・有原文二 2003b. 根粒超着生ダイズ—その特徴と実用化に向けての課題— . *日作紀 (別 1)* 72 : 330–331.
- 高橋幹・島田信二・有原文二・中山則和・島村聡・中村卓司・山本亮 2004. スーパーノジュレーション大豆の不耕起狭畦栽培技術の確立. *ファーミングシステム研究* 5 : 35–39.
- 高橋幹 2005. 根粒超着生ダイズの特性と実用化への試み. *日本土壤肥料学会編, ダイズの生産・品質向上と栄養生理*. 博友社, 東京. 107–128.
- Takahashi, M., N. Nakayama and J. Arihara 2005a. Plant nitrogen levels and photosynthesis in the supernodulating soybean (*Glycine max* L. Merr.) cultivar 'Sakuhei 4'. *Plant Prod. Sci.* 8 : 412–418.
- Takahashi, M., S. Shimada, N. Nakayama and J. Arihara 2005b. Characteristics of nodulation and nitrogen fixation in the improved supernodulating soybean (*Glycine max* L. Merr.) cultivar 'Sakuhei 4'. *Plant Prod. Sci.* 8 : 405–411.
- Tazawa, J., M. Takahashi, K. Usuki, K. Katayama and H. Yamamoto. 2001. Relation between soybean nodulation and incidence of root necrosis caused by *Calonectria crotalariae*. In JSRR and ISRR eds., *Proc. 6th Symp. Int. Soc. Root Res.*, Nov. 11–15, Nagoya. 414–415.
- 辻博之・松尾和之・山本泰由 1995. 火山灰土壌における不耕起が畑作物の初期生育に及ぼす影響. *日作紀 (別 2)* 64 : 181–182.
- 辻博之 1998. 植物の根に関する諸問題 (61)—不耕起畑における作物の根系—. *農及園* 73 : 374–378.
- Vessey, K.J., K.B. Walsh and D.B. Layzell 1988. Oxygen limitation of N_2 fixation in stem-girdled and nitrate-treated soybean. *Physiol. Plant.* 73 : 113–121.
- Wu, S. and J.E. Harper 1991. Dinitrogen fixation potential and yield of hypernodulating soybean mutants: a field evaluation. *Crop Sci.* 31 : 1233–1240.
- 山本亮・高橋良二・原田久也・高橋幹・島田信二 2004. 根粒超着生変異品種作系 4 号の親子鑑定. *育種学研究* 6 : 149–151.
- Zhao, L., L. Song, F.P.C. Blamey, S. Fukai and B.J. Carroll 1998. Yield and N_2 fixation of backcrossed supernodulating soybean mutants. In *Proc. 9th Aust. Agron. Conf.*, Wagga Wagga, NSW, Australia. 375–378.

Effect of Soil Hardness on the Growth and Yield of Supernodulating Soybean Cultivar Sakukei 4 under Field Conditions :

Satoshi SHIMAMURA¹, Motoki TAKAHASHI², Tsutomu NOHARA³, Takuji NAKAMURA¹, Norikazu NAKAYAMA¹, Ryo YAMAMOTO¹, Yeong-Hoo KIM¹ and Shinji SHIMADA¹ (¹*National Institute of Crop Science, Tsukuba 305-8518, Japan;* ²*Japan International Research Center for Agricultural Sciences;* ³*University of Tsukuba*)

Abstract : The yield of supernodulating soybean cultivar 'Sakukei 4' is stably higher under non-tillage than under tillage conditions. This seems to be due to high sensitivity to soil drought stress of this cultivar, because development of the root system is restricted by supernodulation. To analyze the factor of the sensitivity to drought stress, we compacted the soil to mimic the non-tillage condition and examined the physiological and ecological characteristics of Sakukei 4 and its parental cultivar 'Enrei' in the field with different soil hardness. The development of the root system in Sakukei 4 was inferior to that in Enrei under both soil compacted and non-compacted conditions, which indicated that Sakukei 4 is likely more sensitive to soil drought stress. In Sakukei 4, however, the bleeding rate and stomatal conductance were higher under soil compaction than under non-compaction, indicating that drought stress was mitigated by soil compaction treatment. The shoot dry weight of Sakukei 4 was heavier in soil compaction than in non-compaction from the early growth stage to maturity. The yield of Sakukei 4 in soil compaction was 360-380 g m⁻², which was 50 g m⁻² higher than that in non-compaction in both years. A significant difference between the soil compaction treatment was observed at the 1% level. On the other hand, the compaction treatment had no effect on the growth and yield of Enrei. We conclude that Sakukei 4 has an inferior root system and is more sensitive to soil drought stress than Enrei; however, the water uptake by the root system was improved by soil compaction, which enhanced the volume water content of the soil and mitigated drought stress. Therefore, shoot growth and yield were improved by soil compaction in Sakukei 4.

Key words : Drought stress, Growth, Root mass, Sakukei 4, Soil hardness, Soil water, Supernodulating soybean, Yield.
