

異なる土壌における地下水位制御が根粒着生・非着生大豆の生理特性と子実重に及ぼす影響

島田 信二^{*1}・松浦 和哉^{*2}・藤森 新作^{*3}

目次

| | | | |
|------------|----|---------|----|
| I はしがき | 39 | V 謝辞 | 54 |
| II 材料および方法 | 40 | VI 摘要 | 54 |
| III 結果 | 41 | 引用文献 | 55 |
| IV 考察 | 45 | Summary | 58 |

I はしがき

大豆 (*Glycine max* [L.] Merrill) の生産において、土壌水分は根粒窒素固定、光合成や生育に大きな影響を与え生産性を大きく左右する要因である。日本は、湿潤なアジアモンスーン気候に属し、多くの地域では生育前半は梅雨による多雨環境となる。さらにわが国では大豆作の8割以上は地下水位が比較的高い水田輪換畑での栽培であり、しばしば湿害が問題となる (Kokubun 2013)。

一方、梅雨後は、盛夏には蒸発散が降水を上回り、干ばつ発生の危険が生じる (平沢ら 1994)。このように、日本の大豆作では湿害と干ばつの両方への対策が必要となっている。大豆で発生する湿害や干ばつの回避のために地下水位を制御し、生産性の向上を目指した実験が行われている。今までに地下水位の存在や位置は大豆の生産性に大きな影響を及ぼすことが報告されている (阿部ら 1981, 在原ら 2007, Cooper et al. 1991, Cooper et al. 1992, Mejia et al. 2000, 世古ら 1987, Shimada et al. 1995, Shimada et al. 2012, Williamson and Kriz 1970)。

また、近年、日本では、基盤整備により地下水位を制御可能な地下水位制御システム (FOEAS) が開発され (藤森 2007)、大豆の生産性を向上させる地下水位管理技術が広がりつつある。ところが、FOEASによる地下水位制御によって増収を示した研究報告 (蓮川ら 2014, Matsuo et al. 2013, Shimada et al. 2012) がある一方、必ずしも明瞭な増収効果が見られなかった報告 (竹田・佐々木 2013) もある。この地下水位処理の効果が異なる原因の一つとして土壌の種類が関係していると考えられる。

大豆は子実の窒素含有率が高く、多収を得るには窒素を多量に吸収することが必要である。大豆では、その窒素の由来として、根粒による窒素固定によるものと、土壌あるいは肥料から根系が吸収するものがある。圃場の窒素肥沃度は、大豆の生産性にとって重要であることが指摘されている (西田 2010, 小田原ら 2012)。地下水位は作土の土壌水分を左右し、ひいては有機態窒素の無機化にも影響を与えられ、また、大豆の根粒窒素固定は、その能力

平成30年7月10日受付 平成30年9月25日受理

^{*1}農研機構中央農業研究センター

^{*2}茨城県農業総合センター(現農林水産省食料産業局)

^{*3}元農研機構

は高いものの (Salvagiotti et al. 2008), 干ばつには極めて弱いことが指摘されている (Durand et al. 1987, Marino et al. 2007, Sinclair and Serraj 1995, Sinclair et al. 2007). 一方, 湿害も根粒窒素固定を大きく低下させる (Huang et al. 1975, Jung et al. 2008, Maekawa et al. 2011, Sung 1993).

地下水位制御によって, 降雨後の湿害を避けると共に, 蒸発散要求が大きくて降雨が少ない盛夏の乾燥時には, 地下からの安定した水分供給により干ばつを回避することにより, 重粘で

土壌中の窒素が少ない土壌においては根粒窒素固定活性を高めることを明らかにしてきた (Shimada et al. 2012). しかし, その効果は土壌の種類の違いで異なる可能性がある.

このように大豆に対する地下水位の影響は土壌の種類によって異なることが予想されるので, 4種類の土壌を充填したライシメータにおいて異なる地下水位処理条件を設け, 普通大豆と根粒非着生大豆を栽培して, 葉色, 光合成, 根粒窒素固定および子実の生産性を調査し, 土壌種類毎の地下水位制御効果を解析した.

II 材料および方法

茨城県つくば市の農村工学研究所 (現農村工学研究部門 36° N, 140° E) 内の4種類の土壌, ①グライ土 (LiC), ②灰色低地土 (LiC), ③淡色黒ボク土 (SiL), ④砂丘未熟土 (Sand) を充填した縦3m, 横3m, 深さ1.5mのライシメータを用いた. 処理として, 土壌4水準 (上記), 地下水位4水準; ①対照区 (Cont, 灌水は行わず, 地下水位が-10cm以上に上がった場合のみ暗渠から排水), ②地下水位を-20cm一定に保った-20cm区 (WT20), ③同-40cm区 (WT40), ④同-80cm区 (WT80) とし, 地下水位設定は出芽後から実施した. 地下水位の制御は, 各枠に設置された暗渠パイプの排水口を目標地下水位の高さに設定し, 直径8cmの垂直パイプに灌漑水を継続的に供給して掛け流しすることで実施した. 品種は①エンレイと②En1282 (エンレイの根粒非着生系統) (Francisco and Akao 1993) の2水準で実施した. 4土壌×4地下水位処理の計16枠を用い, 品種はエンレイ (6m²) とEn1282 (3m²) を同一処理枠内に栽培した. 播種前に苦土石灰 80, ようりん 60, 播種後に化成肥料 (0-15-15) 67, 各gm⁻²を施用した. 2006年6月30日, 2007年7月10日, 2008年7月9日に手播きで1株当たり3粒を播種し, 初生葉展開期に間引いて1本立てとし, 畦幅50cm, 株間10cm (20本m⁻²) で栽培した. 播種後に土壌処理除草剤 (アラクロール乳剤, リ

ニュロン水和剤) を散布し, その後, 雑草が生じた場合は人力で除草した. 病害, 虫害の防除は適宜実施した. 2006年には播種後に根粒菌 (*Bradyrhizobium japonicum*, USDA 110) を施用した.

圃場を耕うん前の2006年6月14日に土壌表層15cmの土壌をサンプリングし, 土壌の化学性は常法により測定した. また, 土壌の物理性は, 作土100mlを試料円筒に採取して測定した. 大豆収穫後, 2007年12月10日, 2008年10月28日に作土 (深さ約15cm) を1処理当たり2箇所を採取した. その土壌サンプルについて, 土壌の熱水抽出性窒素をオートクレーブ法 (橋本 1992) により測定した.

地下水位は, 円筒を土壌中に差し込み, フロートを用いて地下水位面を測定した. 土壌の体積含水率は, FieldScout TDR 300 Soil Moisture Meter (Spectrum Technologies Inc. Illinois, U.S.A.) を用いて, 作土表層12cmの値を2006年に測定した.

葉色 (SPAD値) は, 主茎上位に位置する活動中心葉 (主茎上位葉) の頂小葉の3箇所を各区5個体ずつミノルタ SPAD502 (コニカミノルタ株式会社, 東京) で測定した.

みかけの光合成速度はLI-6400 (LI-COR, Lincoln, Nebraska, U.S.A.) を用い, 導入空気のCO₂濃度は380ppmとし, 主茎の活動中心葉に

において人工光による飽和光下 ($1800 \mu \text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$) で測定した。測定は2007年8月22日(エンレイのみ)、2007年9月21日、2008年8月13日、2008年9月3日の10:00~14:30の間に実施した。

子実重、地上部窒素集積量は成熟後、各区生育中庸な20個体(大豆調査基準検討委員会編1975)を個体毎に調査した。子実重は15%水分での値とした。植物体の窒素分析は、2006年と2007年のサンプルについてNCアナライザー(スミグラフ NC-22F, 株式会社住化分析センター、

東京)を用いて計測し、乾物ベースの値で表記した。

エンレイおよびEn1282における成熟期の茎、莢殻、子実中の窒素集積量から、差し引き法(Peoples et al. 2009, Shiraiwa et al. 1994)による根粒窒素固定量を算出した。窒素固定量は年次(2006, 2007)を反復測定因子とした多元配置分散分析を行った。統計解析は、SPSS ver.19.0 (IBM, 東京)を用いた。降水量は、AMeDASの茨城県つくば(館野, 40336)のデータを用いた。

III 結果

1. 土壌の特徴

供試した4つの異なる土壌の物理的特性は表1の通りである。仮比重は、グライ土、灰色低地土、砂丘未熟土、淡色黒ぼく土の順で大きく、孔隙率はその逆の順番であった。飽和透水係数は、砂丘未熟土、灰色低地土、淡色黒ぼく土、グライ土の順で大きかった。また、作物にとって有効な土壌水分量の目安の一つとなるpF1とpF3の時の土壌水分含量の差は、砂丘未熟土、淡色黒ぼく土、灰色低地土、グライ土の順番で大きかった。土壌の全窒素および熱水抽出性窒素は、淡色黒ぼく土、灰色低地土、砂丘未熟土、グライ土の順で大きかった(表2)。

2. 地下水位と土壌表層の体積含水率の推移

2006年から2008年の地下水位および2006年の土壌の体積含水率の推移を図1および図2に示した。Contの地下水位は、夏期の降雨が少ないときには徐々に低下し、-80cm程度まで下がることがあった。土壌表層(0~12cm深)の体積含水率は降雨により変動したが、淡色黒ぼく土と砂丘未熟土では、WT20において他の地下水位処理区と比べて常にかかなり高く推移した。

3. 葉身のSPAD値の推移

継続的な測定を実施した2006年の主茎上位葉における葉色(SPAD値)の推移を図3に示した。En1282は葉色が全般に淡く、また、処理によって2倍程度の差異があった。一方、エンレイではいずれもSPAD値が40以上を示して全体

表1 各土壌の物理特性

| 土壌種類 | 仮比重 g ml ⁻¹ | 孔隙率 % | 土性 | | | 飽和透水係数 cm s ⁻¹ | 各pFにおける体積含水率 | | | |
|--------|---------------------------|----------|--------|----------|---------|------------------------------|--------------|-----------|-----------|----------------|
| | | | 砂 % | シルト % | 粘土 % | | pF 1 % | pF 2 % | pF 3 % | pF1とpF3の差 % |
| グライ土 | 1.3 | 53.4 | 37 | 25 | 38 | 2.96E-05 | 47.7 | 47.4 | 41.5 | 6.2 |
| 灰色低地土 | 1.2 | 54.9 | 44 | 26 | 30 | 2.39E-03 | 50.6 | 42.7 | 35.6 | 15.0 |
| 淡色黒ボク土 | 0.9 | 69.2 | 23 | 74 | 3 | 7.36E-04 | 65.3 | 54.5 | 44.1 | 21.2 |
| 砂丘未熟土 | 1.1 | 60.2 | 87 | 8 | 5 | 1.17E-02 | 52.5 | 28.8 | 20.9 | 31.6 |

表2 各土壌の化学特性

| 土壌種類 | CEC meq 100g ⁻¹ | リン酸 吸収係数 | pH | 有効態リン酸 (トルオーグ法) mg-P ₂ O ₅ 100g ⁻¹ | 交換性カリ mg-K ₂ O 100g ⁻¹ | 全窒素 % | 熱抽出性窒素 mg-N 100g ⁻¹ |
|--------|-------------------------------|-------------|-----|---|---|----------|-----------------------------------|
| グライ土 | 15.1 | 634 | 7.0 | 10.6 | 20.9 | 0.06 | 3.1 |
| 灰色低地土 | 16.7 | 620 | 6.3 | 15.4 | 14.4 | 0.15 | 5.1 |
| 淡色黒ボク土 | 33.7 | 1290 | 6.5 | 11.5 | 27.8 | 0.32 | 6.7 |
| 砂丘未熟土 | 11.5 | 694 | 7.2 | 11.6 | 15.6 | 0.12 | 3.9 |

に高い値で推移し、処理間差は最大でも15%程度で小さかった。

4. みかけの光合成速度

エンレイでは、土壌毎に地下水位に対するみかけの光合成速度の反応は異なる傾向がみられた(図4)。グライ土では、地下水位処理の影響が他の土壌に比べて比較的大きく、特にContにおいて低い傾向が認められた。灰色低地土でも、全般にContが低い傾向にあった。淡色黒ぼく土と砂丘未熟土では、地下水位処理の影響は比較的小さかったが、2008年9月3日調査では、全土壌種類において、Contが低い傾向が認められた。

En1282は、みかけの光合成速度は、全般的にエンレイよりも低く、測定日によって、地下水位による影響は異なった(図5)。2008年8月13日以外では、全般に地下水位は低い方がみかけの光合成速度が高い傾向が認められた。

5. みかけの光合成速度とSPAD値、気孔コンダクタンスおよび葉内CO₂濃度との関係

各処理区(土壌×地下水位)におけるみかけの光合成速度とSPAD値、気孔コンダクタンスおよび葉内CO₂濃度との関係をエンレイは図6、En1282は図7に示した。

SPAD値とみかけの光合成速度の関係について、エンレイでは、2008年9月3日調査を除き、SPAD値の範囲は比較的狭く、みかけの光

合成速度との関係はあまり明瞭ではなかった。En1282ではエンレイに比べてSPAD値がより幅広く分布し、いずれの調査日においてもSPAD値とみかけの光合成速度の間には正の相関関係が認められた。

気孔コンダクタンスとみかけの光合成速度の関係について、エンレイでは2008年8月13日を除き、正の相関関係が認められた。En1282では、3回の調査日全てにおいて有意な相関関係が認められ、2007年9月21日と2008年9月3日では、その関係は特に明瞭であった。En1282では、9月の測定では2カ年ともに地下水位が低い処理区ほどみかけの光合成速度は高い傾向が認められたが(図5)、これは葉色(SPAD値)の高低とおおむね対応していた。

葉内CO₂濃度とみかけの光合成速度の関係について、エンレイでは2007年8月22日は正の相関関係が、2008年9月3日では負の相関関係が認められた。En1282では、いずれの測定日においても両者に特定の関係は認められなかった。

このように、En1282では、いずれの測定日においてもSPAD値、気孔コンダクタンスとみかけの光合成速度との間には正の相関関係が認められ、その関係はエンレイよりも密接であった。エンレイと比べるとEn1282は、SPAD値と気孔コンダクタンスが低い処理区が多く、それらの低下に伴い、みかけの光合成速度が低くなる傾向にあった。

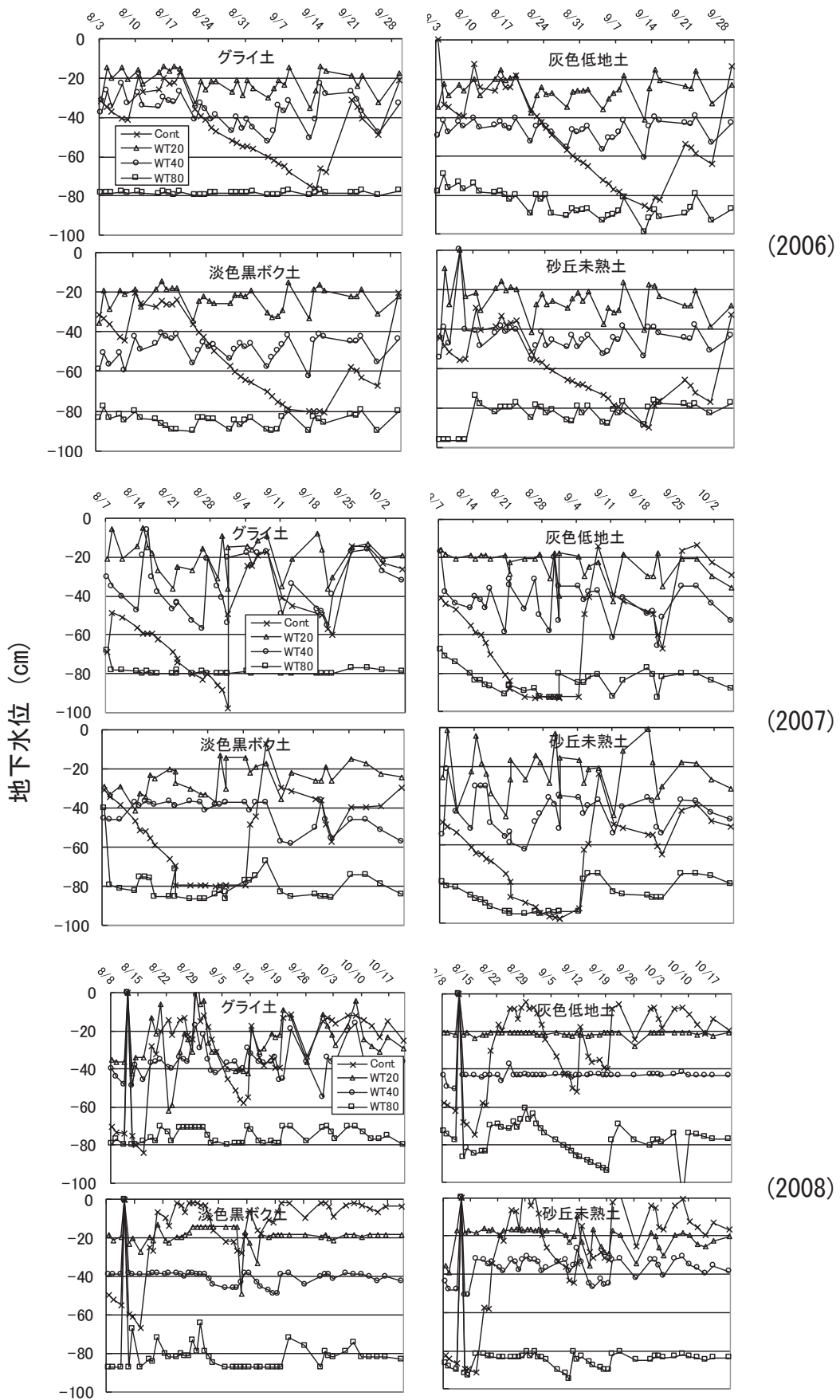


図1 地下水水位の推移

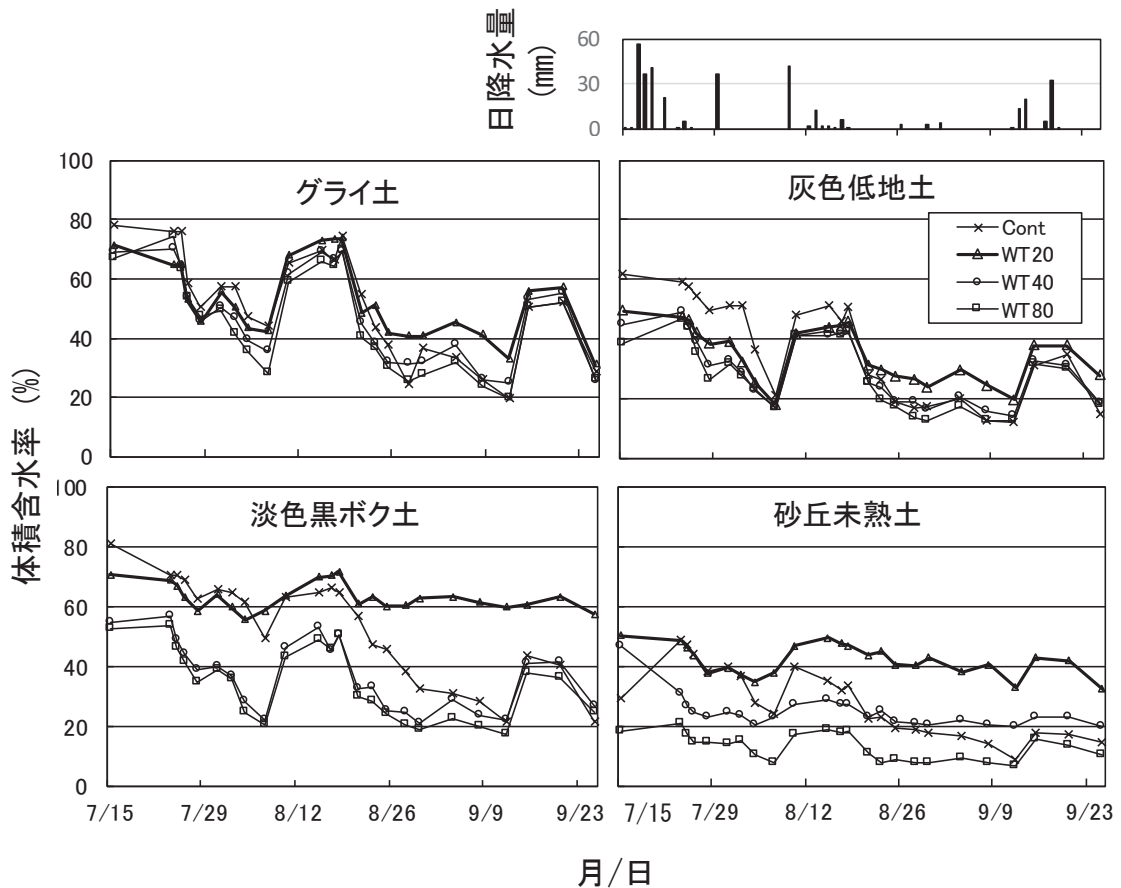


図2 土壤表層 12cmにおける土壤水分の推移 (2006)

6. 根粒窒素固定量

エンレイおよびEn1282における成熟期の莖、莢殻、子実中の窒素集積量から、差し引き法による根粒窒素固定量を算出し、表3に示した。エンレイの根粒窒素固定量は、土壤中の窒素が少ないグライ土(表2)において大きかった。また、地下水位処理によっても影響され、WT40で高い傾向がみられた。

7. 子実重

個体当たりの子実重に対する品種、土壤、地下水位の影響について3カ年平均でみると、エンレイの子実重に対する地下水位の影響は土壤種類によって異なった(図8)。地下水位処理による子実重への影響の程度は、特にグライ土で著しい傾向がみられた。最多収はグライ土のWT40であった。グライ土と灰色低地土はWT40が最多収となり、それよりも高低の地下水位やContが低い傾向を示

した。淡色黒ボク土ではWT20のみがやや低く、砂丘未熟土ではWT80がやや低い傾向がみられた。また、淡色黒ボク土と砂丘未熟土では、Contにおける収量低下はみられなかった。

En1282の子実重に対する地下水位制御の影響は、子実重の絶対値の大小は土壤種類により異なるものの、地下水位処理に対する反応は全て同じで、地下水位が低いほど増収した。また、エンレイとEn1282の子実重には、なんら関係がみられなかった。

8. SPAD値と子実重の関係

子実肥大始期(R5)における主茎上位葉のSPAD値は、エンレイでは、年次によりややばらつきがあるが、2006年、2007年は45~55の間に分布し、処理間差は比較的少なかった(図9)。エンレイの2008年は、1処理区でSPAD値が特に低い処理区(グライ土・Cont)があったが、そ

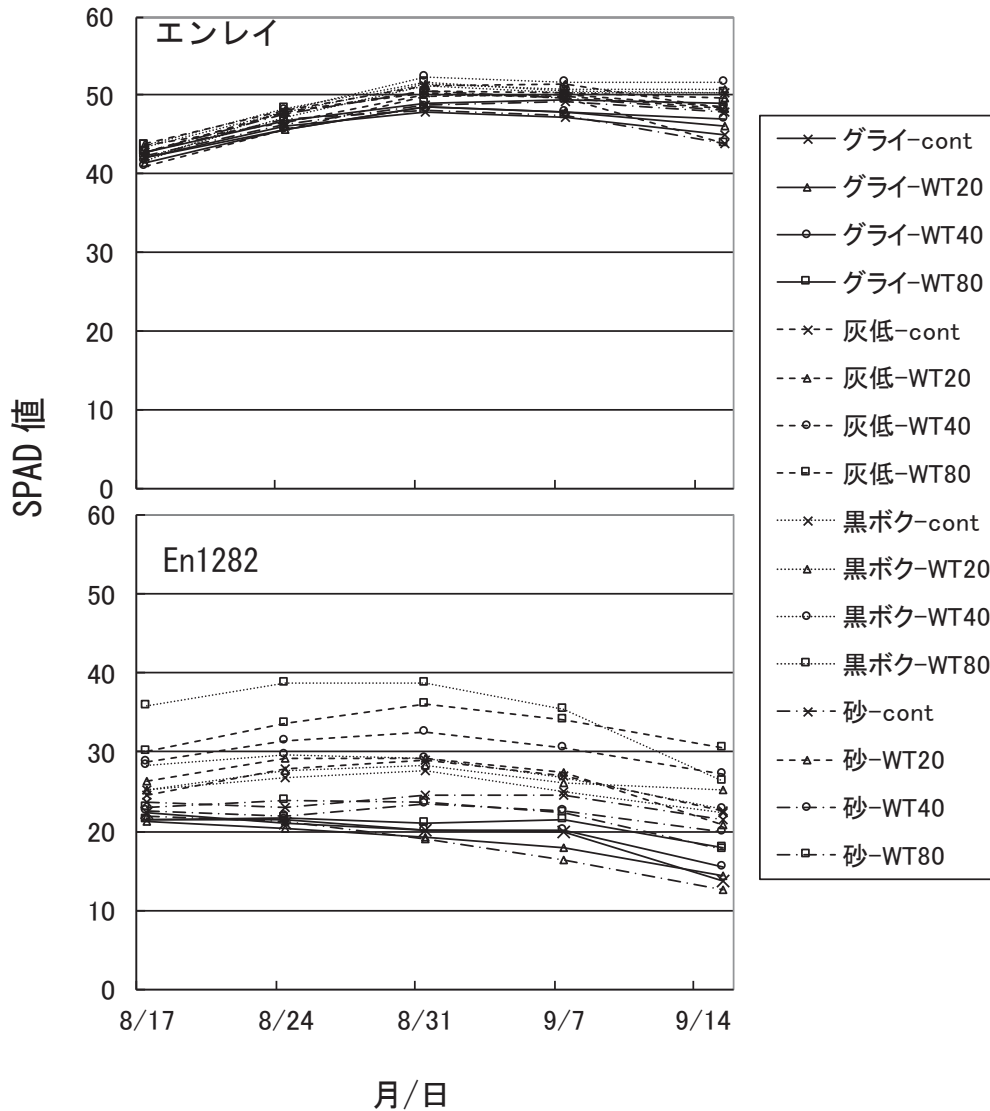


図3 主茎上位葉におけるSPAD値の推移 (2006)
5個体の平均値

れ以外は、40～50の間に分布した。エンレイではSPAD値と子実重の間に明瞭な関係は認められなかった。

一方、En1282では3カ年ともに20～45の間にSPAD値が広く分布し、処理間で葉色に大きな違いが認められた。また、En1282ではSPAD値と子実重の間に3カ年を通じて高い正の相関関係が認められ、SPAD値が高い処理区ほど多収となった。

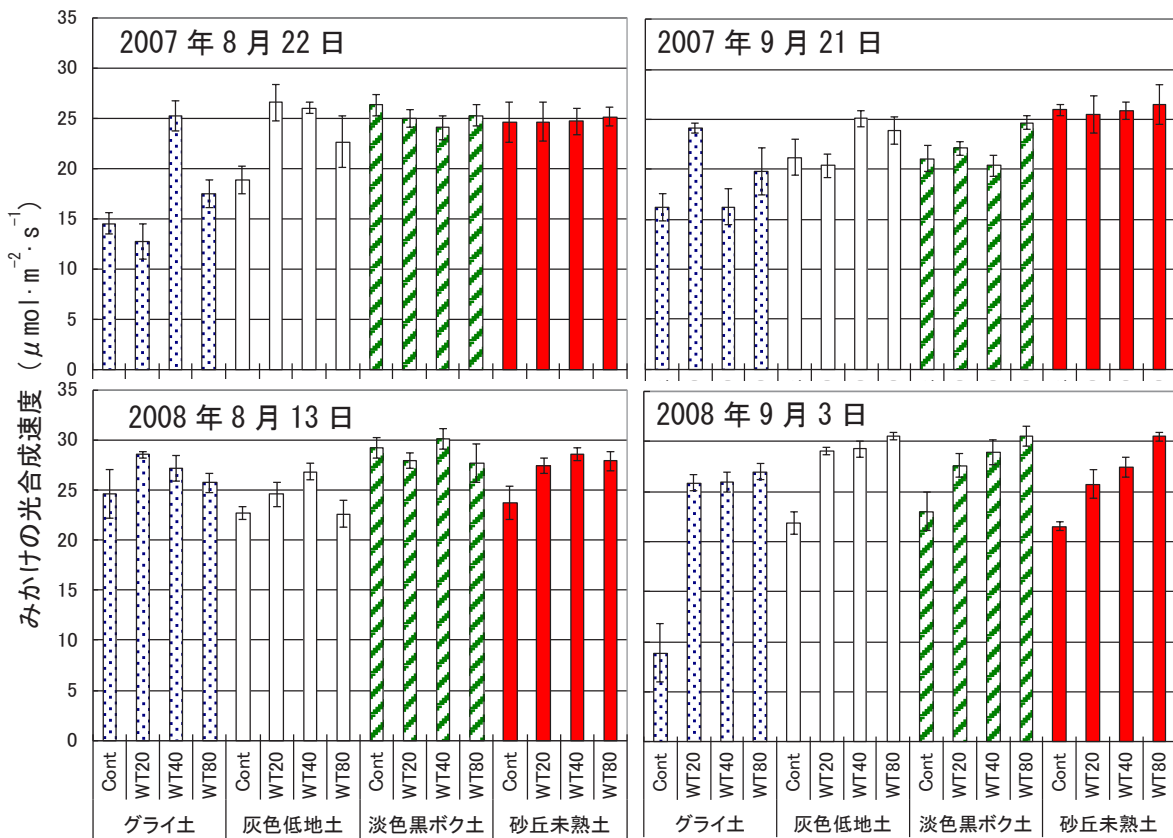
9. 土壌の熱水抽出窒素と子実重の関係

2007年と2008年に測定した収穫後の熱水抽出性窒素含量について、地下水水位処理区毎における子実重との関係を図10に示した。エンレイでは、Contにおいてのみ、En1282ではWT40とWT80において、土壌の熱水抽出性窒素と子実重の間に有意な正の相関関係が認められた。

IV 考察

葉身のSPAD値 (図3) について、En1282では処理間で大きく異なったが、これは圃場からの窒素供

給量が土壌の種類や地下水水位によって異なることにより、葉色が影響されたためと考えられる。一方、



処 理

図4 土壌および地下水位がエンレイのみかけの光合成速度に及ぼす影響
縦線は5個体測定のアverage誤差を示す

根粒が着生する一般の大豆では、作物体の窒素含量はほぼ一定に維持されることが報告されているように (Osaki et al. 1992), エンレイでは、圃場からの窒素供給量が異なっても根粒窒素固定によって、ほぼ一定の葉色に維持されたものと考えられる。

みかけの光合成速度は、地下水位によって影響されることが知られているが (Shimada et al. 1997), 本実験において、根粒着生大豆エンレイのみかけの光合成速度は、グライ土、灰色低地土ではContに比べて地下水位を制御した処理区で高い傾向にあり、また、調査日によっては地下水位の高低による違いも見られた (図4)。淡色黒ぼく土や砂丘未熟土では、2008年9月3日以外では地下水位処理による影響はあまり見られず、土壌の種類によって地下水位がみかけの光合成速度に及ぼす影響はやや異なっていた。

光合成測定前10日間の降水量は、2007年8月22日、2007年9月21日、2008年8月13日、2008年9月3日がそれぞれ4、60、5、174mmであった。

2008年9月3日は、光合成測定前が多雨条件下であったため土壌が過湿条件となり、地下水位が低いほどみかけの光合成速度が全般に高まったものと考えられる。

根粒が着生しないEn1282では、エンレイと比べてSPAD値の処理間差の範囲が広く分布した (図7)。それに伴い、みかけの光合成速度の範囲も幅広く分布し、3回の測定日においてSPAD値とみかけの光合成速度との間の相関係数も比較的高かった。このことからEn1282ではSPAD値で示される葉の葉緑素含量がみかけの光合成速度に大きな影響を与えていたと考えられる。

葉緑素含量とみかけの光合成速度の間には密接な関係にあることが知られているが (Buttery and Buzzell 1977, Ma et al. 1995, Secor et al. 1983), 本実験における窒素源は、En1282では土壌由来のものだけなので、処理区によっては窒素欠乏状態となり葉緑素含量の低下が起こり、みかけの光合成速度の低下に繋がったものと考えられる。

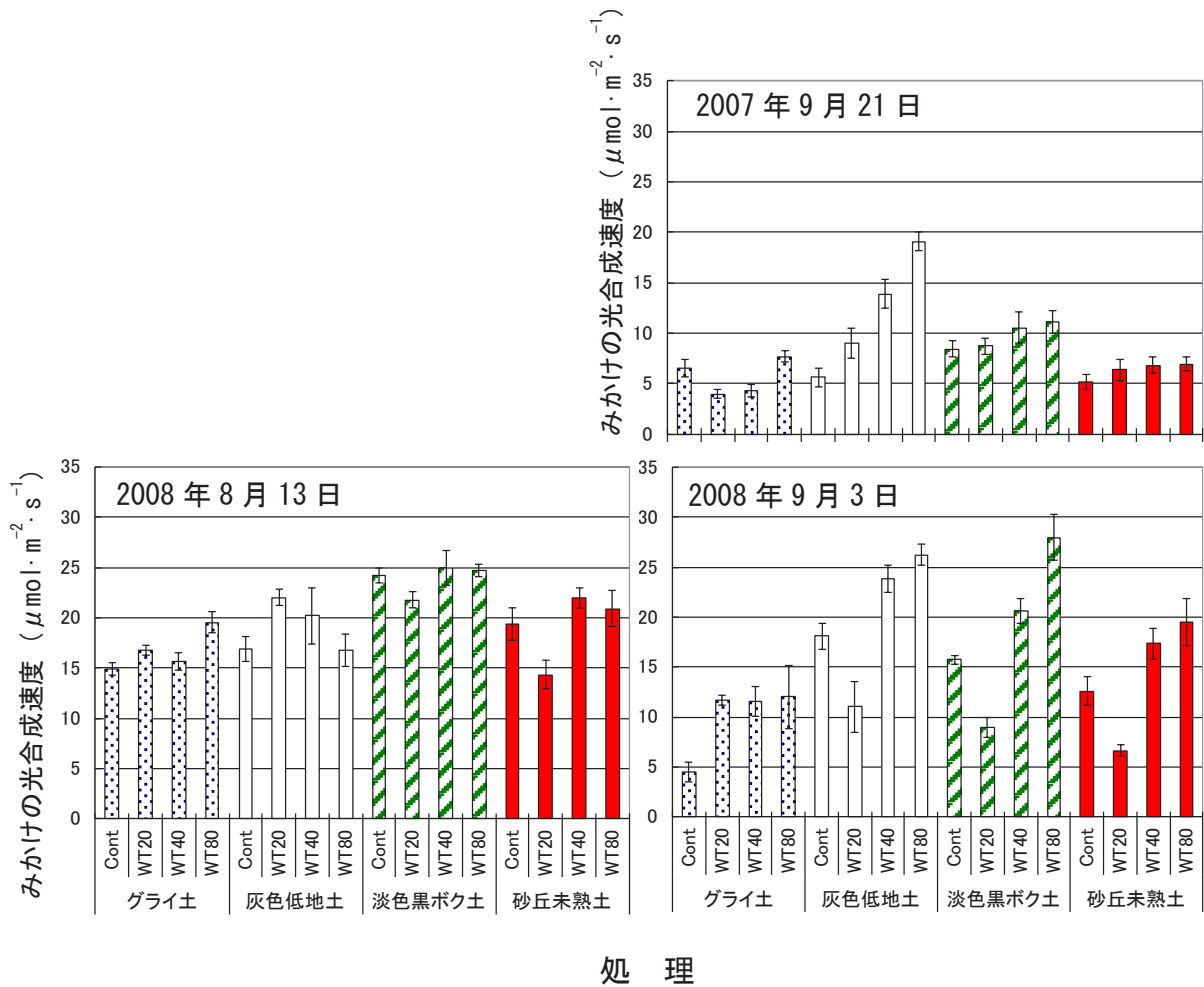


図5 土壌および地下水水位がEn1282のみかけの光合成速度に及ぼす影響
縦線は5個体測定のアverage誤差を示す

気孔コンダクタンスとみかけの光合成速度は、直線的関係ではなく対数関数的な関係にあり、気孔コンダクタンスが上昇してくるとみかけの光合成速度の上昇が逓減し、その後はほぼ横ばいとなることが知られている (Gilbert et al. 2011, Wong et al. 1979). エンレイで2008年8月13日は、気孔コンダクタンスとみかけの光合成速度の間に相関関係が認められなかったのは (図6)、この日の気孔コンダクタンスは、いずれの処理区も $0.5\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ 以上で、比較的高い値であったため、両者に明瞭な関係が見られなかったものと考えられる。

葉内 CO_2 濃度は、En1282ではみかけの光合成速度との関係は認められず、エンレイでは、2測定日でみかけの光合成速度との相関関係が認められたが、2007年8月22日は正、2008年

9月3日は負の相関関係であった。2007年8月22日および2008年9月3日では、測定前10日間の降水量はそれぞれ4mmおよび174mmであり、測定前の降水状況がかなり異なっていた。そのため、2007年8月22日測定では、Contや低地下水水位処理では作土はかなりの乾燥状態であったのに対して、2008年9月3日測定では、多量の降水による多湿状態にあったと考えられる。そのため、2007年8月22日測定では、気孔コンダクタンスがかなり低い処理区があり、それに伴い、一部の処理区では葉内 CO_2 濃度も低くなり、みかけの光合成速度も低下したものと考えられる。一方、2008年は8月16日から9月1日まで、ほぼ毎日降雨があり、その間の積算降水量は284mmあった。このように多湿条件であった2008年9月3日測定では、SPAD値

とみかけの光合成速度に高い正の相関がみられたことから (図6), 圃場の過湿による低いSPAD値がみかけの光合成速度低下の主な原因であったと思われる。

穏やかな干ばつ下では, 気孔コンダクタンスとみかけの光合成速度の関係には曲線的な関係が認められる (Flexas and Medrano 2002, Gilbert et al. 2011). 水分欠乏ストレスを生じさせた時の大豆では, みかけの光合成速度や気孔コンダクタンスの減少が生じたが, そのときの葉内CO₂濃度はほぼ一定に保たれていたことが報告されている (Allen et al. 1994). また, 気孔は葉内CO₂濃度をほぼ一定に保つ働きがあるとされている (Wong et al. 1979). 本実験でも気孔コンダクタンスの分布幅に比べて葉内CO₂濃度の分布幅は小さいことから, 2007年8月22日のエンレイのように, 特に著しい干ばつが発生しない限り, 気孔コンダクタンスは葉内CO₂濃度をほぼ一定に保つように働いていたものと推察される。

根粒窒素固定量 (表3) は, 土壤間ではグライ土が最も高かった。その原因の一つとして, グライ土では全窒素や熱水抽出性窒素が他の土壤に比べて低いことが関係していると考えられる。一方, 地下水位処理ではWT40が最も高かった。FOEASによって地下水位を-32cmに維持した処理区では, 地下水位制御を行っていない処理に比べて根粒窒素固定活性が向上することを報告した (Shimada et al. 2012)。本実験においてもWT40において根粒窒素固定量が最大となったことから, 根粒窒素固定量は, 地下水位により影響を受け, 地下水位が-40cm前後で高くなることが推察される。

地下水位一定条件下では, WT80において根粒窒素固定量が最も低い値を示している。その原因として, ①En1282では低地下水位ほどSPAD値が高く推移し (図3), 子実重が増大 (図8) することから示されるように, より低い地下水位で土壤由来の吸収窒素量が増大すること, ②低地下水位では軽微な水分欠乏ストレスが生じて根粒窒素固定活性が落ちたこと, 等が関係していると推察される。特に根粒窒素固定は, 水分欠乏ストレス下で光合成よりも先に低下し (Durand et al.

1987, Sinclair et al. 1987), 軽微な水ストレス下でも根粒窒素固定が低下することが報告されている (Sinclair and Serraj 1995)。グライ土や灰色低地土では, 測定日によっては, WT80は他の高い地下水位処理区よりもみかけの光合成速度がやや低下することもあったように (図4), 地下水位が存在しているも, 土壤水位面から毛管水が上昇しにくいこれら土壤では, 生育中に軽微な水分欠乏ストレスが生じ, 根粒窒素固定活性が低下した可能性が推察される。

エンレイでは, グライ土と灰色低地土では, 地下水位を制御していないContが最も子実重が低く, WT40において最も子実重が高くなる傾向を示し (図8), 今までの報告 (Shimada et al. 1995, Williamson and Kriz 1970) と同様に収量を最大とする好適な地下水位の存在が認められた。また, Cooperら (Cooper et al. 1992) は, 飽和透水係数が低く排水性の悪いsilt loamにおける地下水位-41cm, -56cm, -71cmの3水準の比較において, 最も高い地下水位-41cmで最多収となったことを報告しているが, 本実験でも最も飽和透水係数が低く, 排水性の悪いグライ土においては-40cmが最多収となっており, 類似の傾向が認められた。

他方, 淡色黒ぼく土ではWT20が低い傾向にあった。淡色黒ぼく土のWT20では, 図2に示されるように表層12cmの体積含水率は60%前後で推移しており, 肉眼観察でも常に表層まで湿った状態にあった。このことから, 淡色黒ぼく土のWT20が低収であった原因として, 地下水位面からの毛管水上昇によって作土が過湿状態となり, 軽度の湿害が発生していたためと思われる。また, 淡色黒ぼく土や砂丘未熟土では, Contの収量は低くはなく, この地下水位処理の範囲では好適な地下水位の存在は不明瞭であった。

このように土壤の種類によって, みかけの光合成速度, 子実重に対する地下水位制御の影響が異なった。その原因として次のことが考えられる。グライ土と灰色低地土は, 淡色黒ぼく土や砂丘未熟土に比べて粗孔隙率が低い (表1)。さらに各土壤におけるpF1からpF3における土壤体積含水率の変化をみると, グライ土と灰色低地土は淡

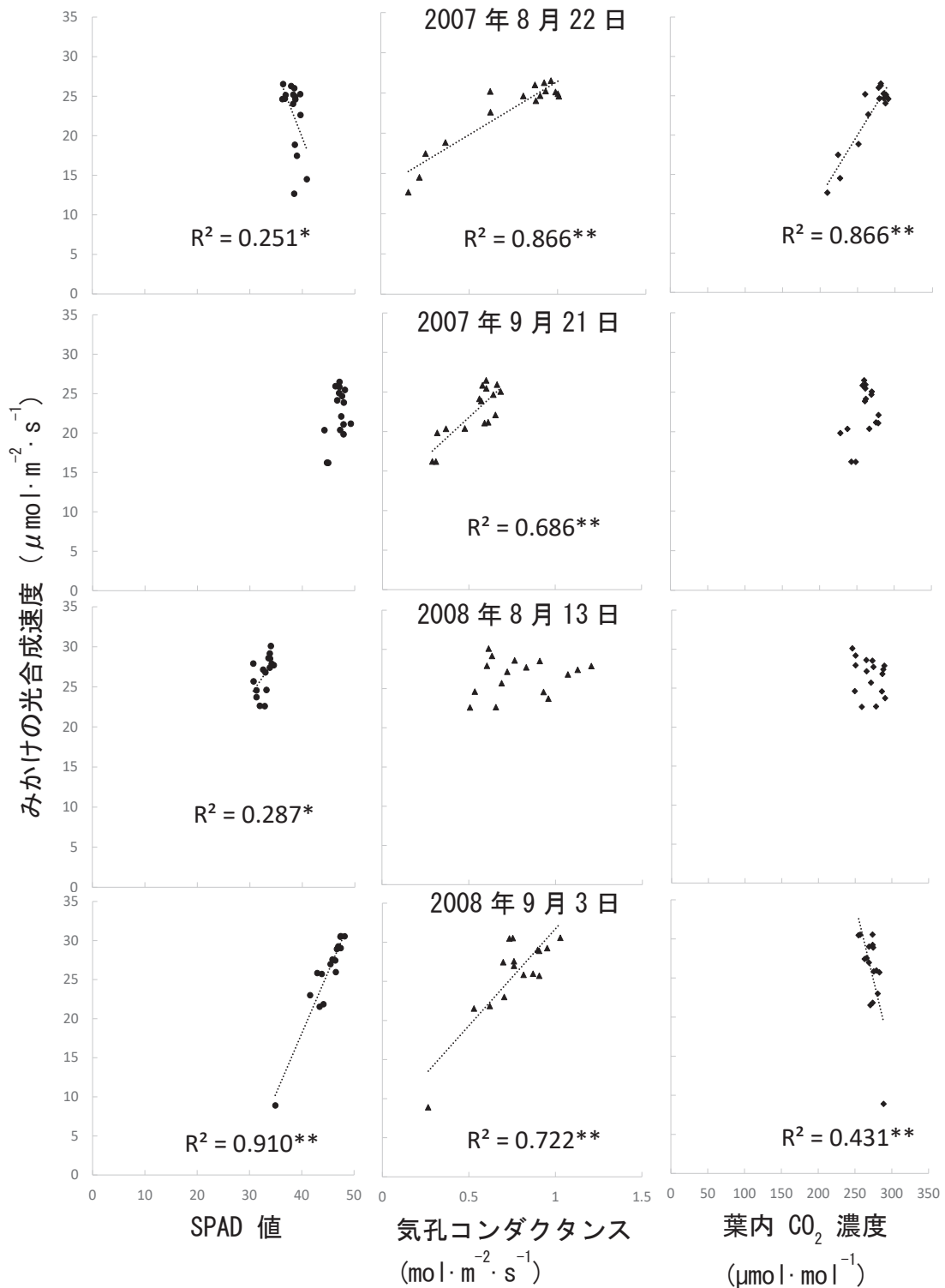


図6 エンレイにおけるみかけの光合成速度とSPAD値、気孔コンダクタンス、葉内 CO_2 濃度との関係

各点は処理毎に5個体測定した平均値を示す

*と**はそれぞれ5%および1%水準で有意性あり (n=16).

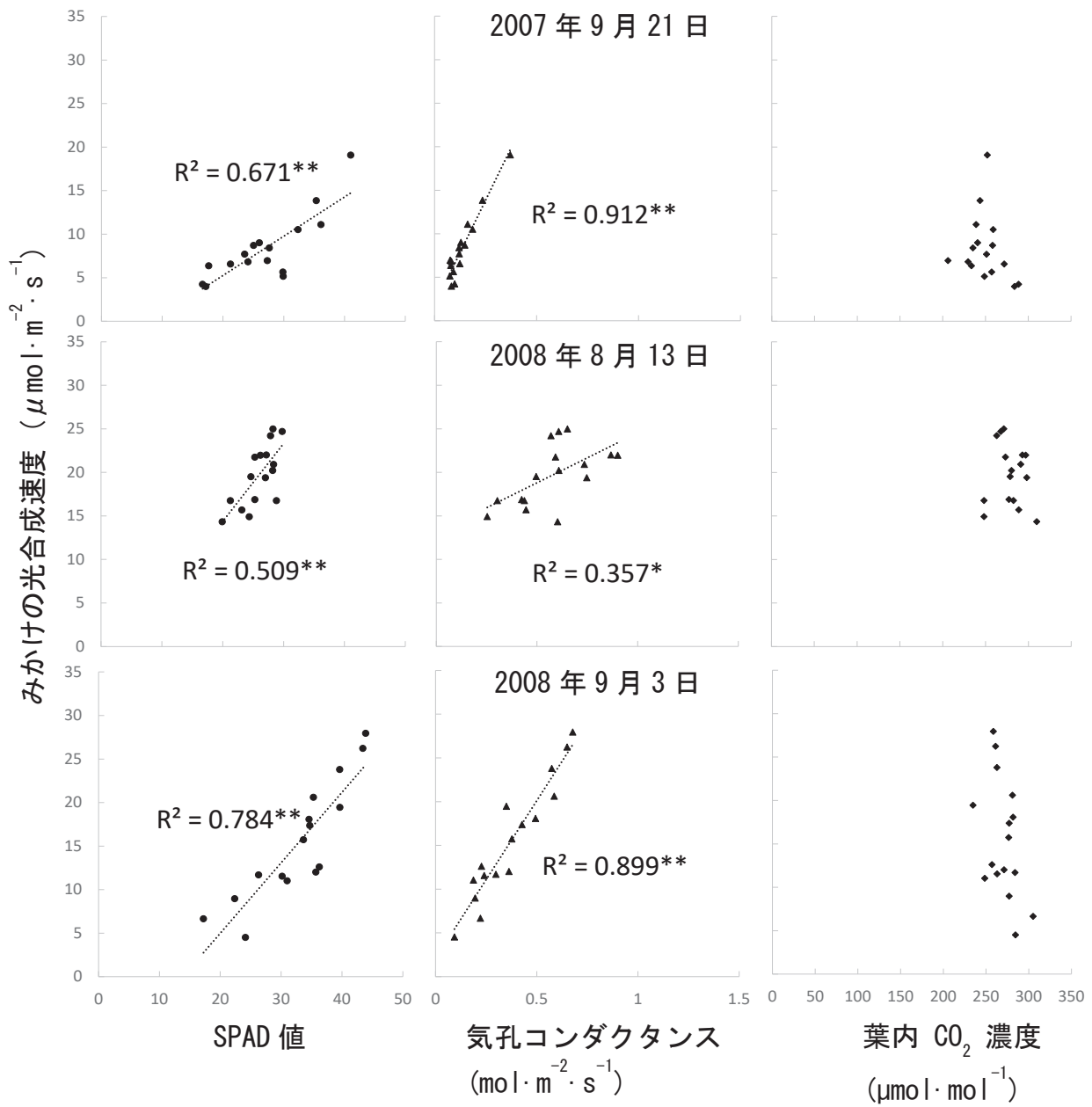


図7 En1282におけるみかけの光合成速度とSPAD値、気孔コンダクタンス、葉内 CO_2 濃度との関係
図の説明は図6と同じ

表3 大豆品種エンレイの根粒窒素固定量に及ぼす 土壌および地下水位の影響

| 要因 | 処理 | 根粒窒素固定量 (g 個体 ⁻¹) | |
|------|-----------|----------------------------------|----------|
| 土壌 | グライ土 | 1.336 | |
| | 灰色低地土 | 1.009 | |
| | 淡色黒ボク土 | 1.145 | |
| | 砂丘未熟土 | 1.213 | |
| 地下水位 | Cont | 1.081 | |
| | WT20 | 1.189 | |
| | WT40 | 1.356 | |
| | WT80 | 1.076 | |
| 分散分析 | 土壌 | d.f. 3 | p値 0.011 |
| | 地下水位 | d.f. 3 | p値 0.015 |
| | 土壌 × 地下水位 | d.f. 9 | p値 0.094 |
| | 残差 | d.f. 15 | |

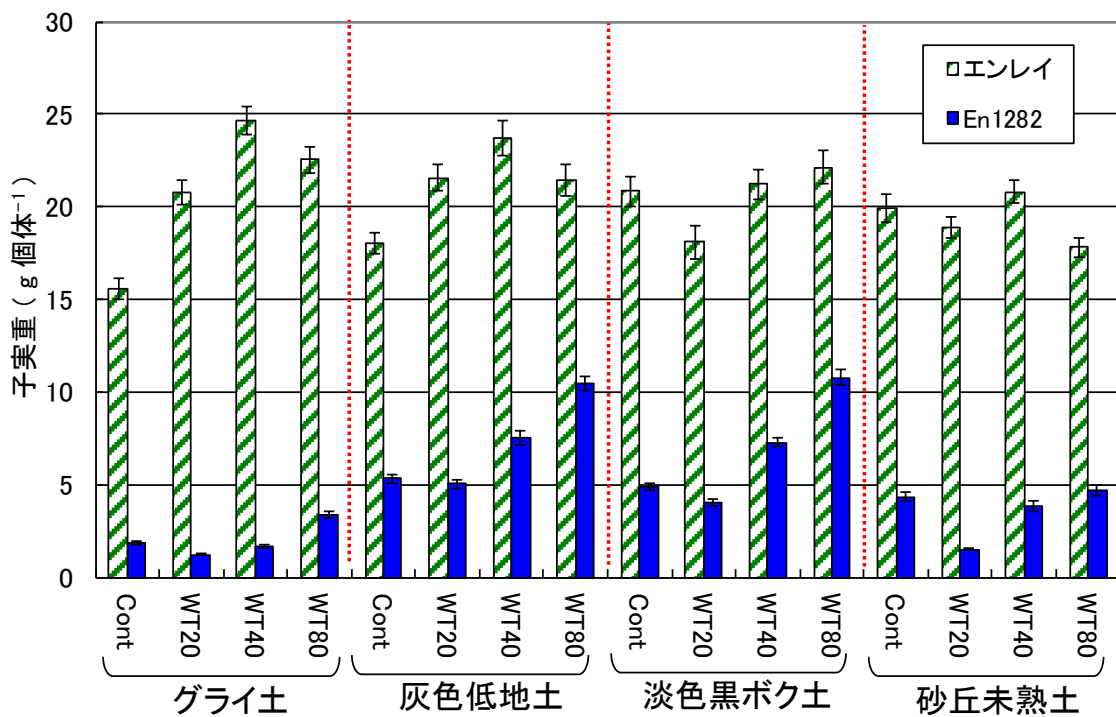


図8 土壌の種類と地下水位がエンレイ、En1282の子実重に及ぼす影響
2006～2008年の3カ年、毎年20個体、3カ年で計60個体を測定し、
棒グラフはその平均値、縦線は標準誤差を示す

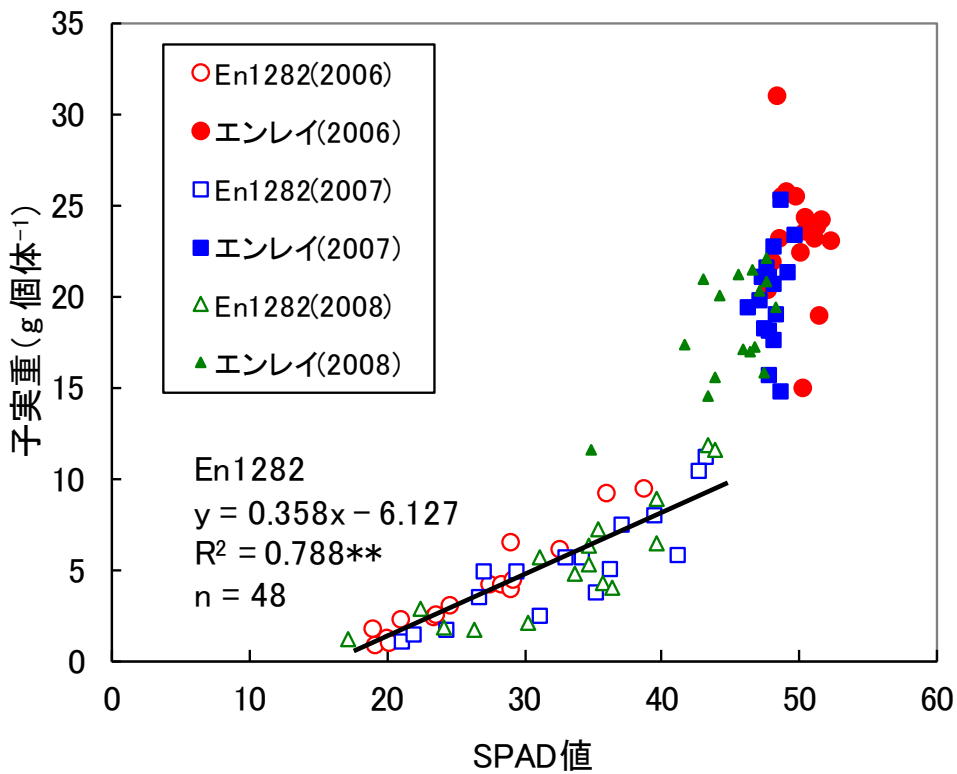


図9 子実肥大期 (R5) の主茎上位葉のSPAD値と成熟期の子実重の関係 (2006-2008)

SPAD値は2006/8/31、2007/9/4、2008/9/2測定

**は1%水準で有意性あり

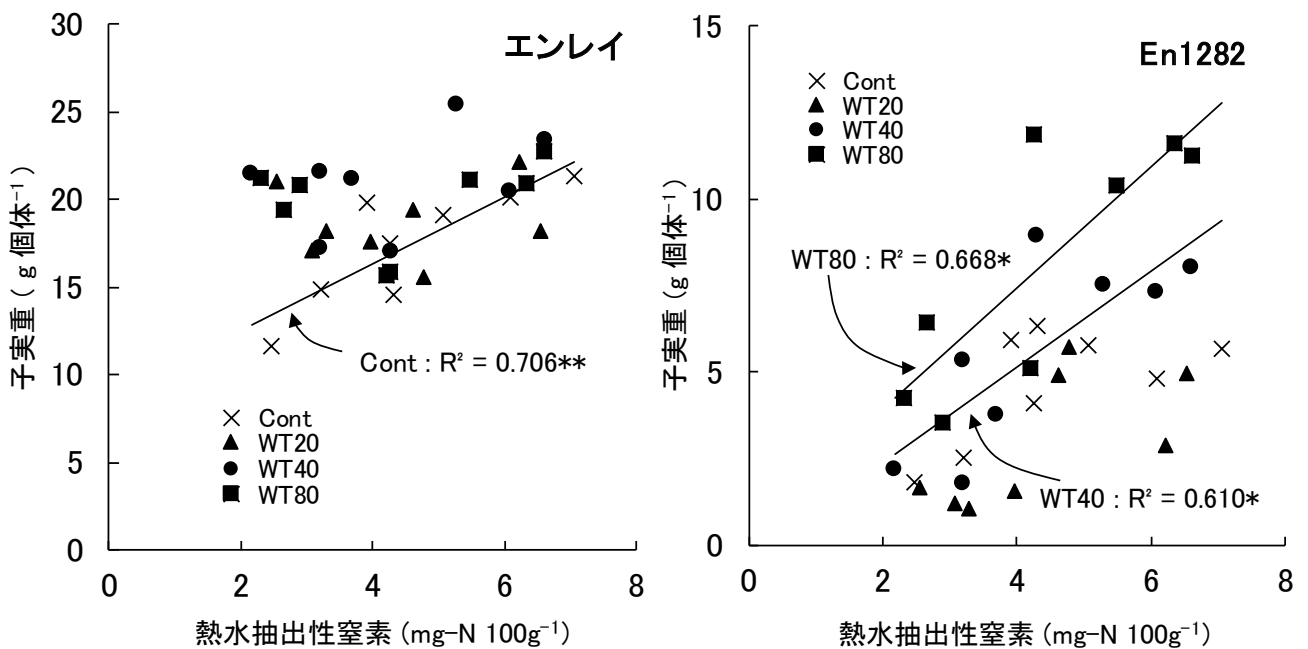


図10 土壌の熱水抽出性窒素とエンレイ、En1282の子実重との関係

相関関係は、品種、地下水位処理毎に2カ年(2007~2008年)の値を用いて算出(4土壌×2カ年、n=8)

*と**はそれぞれ5%および1%水準で有意性あり

色黒ぼく土や砂丘未熟土に比べてその変化量が少ないことから、作物が容易に吸収できる水分量がグライ土と灰色低地土において少ないことを示していると考えられる。また、地表から深さ12cmまでの体積含水率の推移(図2)をみると、淡色黒ぼく土と砂丘未熟土はWT20の体積含水率が他の地下水位区と比べて常に高く推移しているのに対して、グライ土と灰色低地土では、地下水位処理区間の差がほとんど認められない。このことは、地下水位面からの毛管水上昇程度が淡色黒ぼく土と砂丘未熟土は比較的大きく、グライ土と灰色低地土では小さいことを示していると考えられる。よって、地下水位面上における大豆の吸水にとって好適な土層の厚さは、淡色黒ぼく土や砂丘未熟土に比べて、グライ土と灰色低地土では小さいことを示唆していると考えられる。これらのことからグライ土と灰色低地土において、みかけの光合成速度や子実重において好適地下水位の存在がより明瞭と現れる原因ではないかと推察される。

En1282は低地下水位ほど増収するのは(図8)、地下水位低下に伴い、下層の土壤が乾燥しやすくなることにより大豆の根域が拡大されること(Shimada et al. 1995)、および好気的条件となる土層が広がることにより土壤中の有機物の無機化が促進され、植物体へ供給される窒素量が増えることが関係していると考えられる。

子実肥大期(R5)のエンレイのSPAD値と子実重との間には明瞭な関係は見られなかったが、En1282では、両者の間に3カ年を通じて密接な関係が認められた(図9)。根粒が着生する通常の大豆では、葉色がほぼ一定の水準に維持されたため、葉色が子実重に及ぼす影響が認められなかったものと考えられる。一方、根粒が着生しない大豆では、土壤からの窒素供給量によって、葉色に示される植物体の窒素栄養状況が左右され、その結果、光合成等を通じて子実重に直接的な影響が生じたものと考えられる。

土壤中の熱水抽出性窒素量は、畑作物における土壤からの窒素供給量の指標となるため、畑作物の窒素肥沃度評価法として北海道で広く利用されている(谷口1992, 渡辺ら2003)。エン

レイではCont以外は、熱抽出性窒素と子実重の間には関係が認められなかった。根粒窒素固定活性は、土壤水分の欠乏(Sinclair and Serraj 1995)や湿害(Maekawa et al. 2011, Sung 1993)に大きな影響を受け、地下水位の制御は根粒窒素固定向上に効果がある(Shimada et al. 2012)ことが報告されている。エンレイのContでは土壤水分の変動が著しいため根粒窒素固定が各地下水位制御区よりも抑制された可能性があり、そのため、子実重が土壤からの窒素供給に影響を受けたものと思われる。一方、En1282では、WT40とWT80において熱水抽出性窒素と子実重の間に有意な相関関係が認められた。これは、地下水位がより低い処理区の方が下層まで土壤が乾きやすくなり、土壤からの窒素供給量の指標となる熱水抽出性窒素量に対して、En1282の子実重がより明瞭に影響されるようになったためと考えられる。

根粒非着生大豆では窒素の施肥量に比例して収量が増大するが、根粒着生大豆では、窒素施肥への反応はあまりみられないことが報告されている(松永ら1983, Weber 1966)。また、高橋らは、新潟県の現地水田転換畑において大豆の収量に及ぼす土壤特性の影響を解析したところ、収量は、作土中の可給態窒素量よりも土壤の排水性に強く影響されていたことを報告している(高橋ら2005)。本実験において、根粒非着生大豆のEn1282では、土壤からの窒素供給量によって子実重が左右されたのに対して、根粒着生大豆のエンレイでは、地下水位制御による土壤水分の好適化により、根粒が良く機能したため、土壤からの窒素供給量は収量を左右しなかったものと考えられる。

以上から、根粒着生大豆であるエンレイに対する地下水位制御の影響は土壤種類によって異なり、特にグライ土や灰色低地土で光合成向上や増収への効果が大きく、淡色黒ぼく土や砂丘未熟土ではその効果が小さいことが分かった。グライ土や灰色低地土で地下水位制御効果が大きい理由の一つとして、土壤の保水性や地下水位面からの毛管水上昇程度などの土壤特性が関係しているものと考えられる。

また、En1282では、土壌からの窒素供給が葉色や光合成などを通じて生産性を大きく左右しているが、エンレイでは根粒窒素固定の貢献が大きく、地下水位を制御すると土壌からの窒素供給は子実の生産性にほとんど影響しないことが分かった。

V 謝辞

根粒菌を提供いただいた中央農業研究センターの山本亮博士、統計解析について懇切な助言をいただいた中央農業研究センターの光永貴之博士、圃場管理、実験遂行にご協力をいただいた業務科職員および研究室職員に深く謝意を

以上から、グライ土や灰色低地土などの土壌では、地下水位制御による効果が高く、好適な地下水位の維持は、光合成、根粒窒素固定活性を向上させ、増収に大きく貢献できると考えられる。

表する。

本研究は、農水省委託プロジェクト「低コストで質の良い加工・業務用農産物の安定供給技術の開発 2系 大豆」の支援により実施した。

VI 摘要

地下水位は大豆の生育や根粒窒素固定を通して、生産性に影響を与えることが知られているが、その影響は土壌の特性によって異なることが想定される。そこで、品種エンレイとその根粒非着生準同質遺伝系統En1282を用いて、4つの異なる土壌種類（グライ土、灰色低地土、淡色黒ぼく土、砂丘未熟土）において4つの地下水位処理（地下水位を制御しない対照区；Cont, 地下水位を地表下-20cmに維持した区；WT20, 同-40cm；WT40, 同-80cm；WT80）を実施し、葉色（SPAD値）、みかけの光合成速度、根粒窒素固定および子実重等に及ぼす影響を解析した。その結果、SPAD値はEn1282では、土壌の種類や地下水位によって大きく影響されたが、エンレイではその影響はわずかであった。エンレイのみかけの光合成速度は、グライ土、灰色低地土では地下水位処理による明らかな影響が認められ、対照区が低い傾向がみられたが、淡色黒ぼく土、砂丘未熟土では地下水位の影響はわずかであった。En1282のみかけの光合成速度は、低い地下水位処理区ほど高い傾向が認められた。根粒窒素固定量は、土壌種類ではグライ土、地下水位処理ではWT40において高い傾向が認められた。個体当たり子実重

は、グライ土、灰色低地土では、対照区が最も低くてWT40が最多収であり、淡色黒ぼく土ではWT20、砂丘未熟土ではWT80が、それぞれ最も収量が低い傾向となり、土壌の種類によって地下水位の影響は異なった。子実肥大期（R5）の主茎上位葉のSPAD値と子実重の間には、エンレイでは関係が認められなかったが、En1282では高い正の相関関係が認められた。また、土壌の熱水抽出性窒素含量と子実重の間には、En1282ではWT40とWT80で、エンレイでは対照区において相関関係が認められた。このことから、En1282では土壌からの窒素供給可能性が、SPAD値、みかけの光合成速度、子実重に大きな影響を与えたと考えられる。

以上から、地下水位制御による大豆の子実重への効果には、光合成、根粒窒素固定や土壌からの窒素供給量が関係していることが推察された。また、土壌の種類によって地下水位の影響が異なり、土壌の孔隙が少なく保水性に乏しいグライ土、灰色低地土では、地下水位制御による増収効果が比較的大きかった。よって、これら土壌では地下水位の制御が大豆の多収化に重要であることが示された。

引用文献

- 阿部盟夫・吉野昭一郎・内田文雄 (1981) 火山灰水田における効率的な水利用に関する研究 第3報. 転換畑における地下水位の高低と導入作物の生育について. 栃木県農業試験場研究報告, 29-40.
- Allen, L.H., R.R. Valle, J.W. Mishoe and J.W. Jones (1994) Soybean leaf gas-exchange responses to carbon dioxide and water stress. *Agronomy Journal*, 86, 625-636.
- 在原克之・小柴伸夫・奥山泰河 (2007) 浅層暗渠の高密度敷設による地下水位制御が大豆の生育と収量に及ぼす影響. 千葉県農業総合研究センター研究報告, 103-110.
- Buttery, B.R. and R.I. Buzzell (1977) The relationship between chlorophyll content and rate of photosynthesis in soybeans. *Canadian Journal of Plant Science*, 57, 1-5.
- Cooper, R.L., N.R. Fausey and J.G. Streeter (1991) Yield potential of soybean grown under a subirrigation drainage water management-system. *Agronomy Journal*, 83, 884-887.
- Cooper, R.L., N.R. Fausey and J.G. Streeter (1992) Effect of water table level on the yield of soybean grown under subirrigation/drainage. *Journal of Production Agriculture*, 5, 180-184.
- 大豆調査基準検討委員会編 (1975) “大豆調査基準”. 農林水産技術会議事務局、農林省農事試験場, 1-16.
- Durand, J.L., J.E. Sheehy and F.R. Minchin (1987) Nitrogenase activity, photosynthesis and nodule water potential in soybean plants experiencing water deprivation. *Journal of Experimental Botany*, 38, 311-321.
- Flexas, J. and H. Medrano (2002) Drought-inhibition of photosynthesis in C₃ plants: stomatal and non-stomatal limitations revisited. *Annals of Botany*, 89, 183-189.
- Francisco, P.B.J. and S. Akao (1993) Autoregulation and nitrate inhibition of nodule formation in soybean cv. Enrei and its nodulation mutants. *Journal of Experimental Botany*, 44, 547-553.
- 藤森新作 (2007) 転換作物の安定多収をめざす地下水位調節システム. 農業および園芸, 82, 570-576.
- Gilbert, M.E., M.A. Zwieniecki and N.M. Holbrook (2011) Independent variation in photosynthetic capacity and stomatal conductance leads to differences in intrinsic water use efficiency in 11 soybean genotypes before and during mild drought. *Journal of Experimental Botany*, 62, 2875-2887.
- 橋本均 (1992) “熱水抽出性窒素”. 土壌および作物栄養の診断基準-分析法 (改訂版) -. 北海道立中央農業試験場, 80-81.
- 蓮川博之・高橋有紀・鳥塚智・河村久紀・山田善彦 (2014) 地下水位制御システム施工直後のダイズ圃場における環境影響評価と窒素収支の解明. *日本土壌肥料学雑誌*, 85, 509-514.
- 平沢正・田中一生・宮本大輔・武居理英・石原邦 (1994) 開花前の低土壌水分が稔実期の乾燥条件におけるダイズの乾物生産と生理生態的性質に及ぼす影響. *日本作物学会紀事*, 63, 721-730.
- Huang, C.-Y., J.S. Boyer and L.N. Vanderhoef (1975) Acetylene reduction (nitrogen fixation) and metabolic activities of soybean having various leaf and nodule water potentials. *Plant Physiology*, 56, 222-227.
- Jung, G., T. Matsunami, Y. Oki and M. Kokubun (2008) Effects of waterlogging on nitrogen fixation and photosynthesis in supernodulating soybean cultivar Kanto 100. *Plant Production Science*, 11, 291-297.
- Kokubun, M. (2013) Genetic and cultural improvement of soybean for waterlogged conditions in Asia. *Field Crops Research*, 152, 3-7.

- Ma, B.L., M.J. Morrison and H.D. Voldeng (1995) Leaf greenness and photosynthetic rates in soybean. *Crop Science*, 35, 1411-1414.
- Maekawa, T., S. Shimamura and S. Shimada (2011) Effects of short-term waterlogging on soybean nodule nitrogen fixation at different soil reductions and temperatures. *Plant Production Science*, 14, 349-358.
- Marino, D., P. Frendo, R. Ladrera, A. Zabalza, A. Puppo, C. Arrese-Igor and E.M. Gonzalez (2007) Nitrogen fixation control under drought stress. localized or systemic? *Plant Physiology*, 143, 1968-1974.
- 松永亮一・松本重男・島野至・島田信二 (1983) ダイズの窒素肥料反応性の品種間差異に及ぼす根粒着生の影響. *日本作物学会紀事*, 52, 423-429.
- Matsuo, N., M. Takahashi, H. Nakano, K. Fukami, S. Tsuchiya, S. Morita, H. Kitagawa, K. Nakano, H. Nakamoto and K. Tasaka (2013) Growth and yield responses of two soybean cultivars grown under controlled groundwater level in southwestern Japan. *Plant Production Science*, 16, 84-94.
- Mejia, M.N., C.A. Madramootoo and R.S. Broughton (2000) Influence of water table management on corn and soybean yields. *Agricultural Water Management*, 46, 73-89.
- 西田瑞彦 (2010) “田畑輪換水田の土壤窒素肥沃度の変化と土壤管理による制御”. 田畑輪換土壤の肥沃度と管理-変化の要因と制御の考え方-. 博友社, 東京, 27-52.
- 小田原孝治・福島裕助・荒木雅登・兼子明・荒巻幸一郎 (2012) 筑後川流域の田畑輪換圃場における土壤肥沃度とダイズ子実収量性の実態. *日本土壤肥料学雑誌*, 83, 405-411.
- Osaki, M., T. Shinano and T. Tadano (1992) Carbon-nitrogen interaction in field crop production. *Soil Science and Plant Nutrition*, 38, 553-564.
- Peoples, M.B., M.J. Unkovich and D.F. Herridge (2009) “Measuring symbiotic nitrogen fixation by legumes”. *Nitrogen Fixation in Crop Production*. ASA, CSSA and SSSA, Madison, WI USA, 125-170.
- Salvagiotti, F., K.G. Cassman, J.E. Specht, D.T. Walters, A. Weiss and A. Dobermann (2008) Nitrogen uptake, fixation and response to fertilizer N in soybeans: A review. *Field Crops Research*, 108, 1-13.
- Secor, J., R. Shibles and C.R. Stewart (1983) Metabolic changes in senescing soybean leaves of similar plant ontogeny. *Crop Science*, 23, 106-110.
- 世古晴美・佐村董・加護谷栄章・二見敬三・吉倉惇一郎・沢田富雄・青山喜典 (1987) 排水改良転換畑における大豆栽培の多収安定化-3-地下水位の高低と灌水の影響. *兵庫県農業総合センター研究報告*, 35, 21-24.
- Shimada, S., M. Kokubun and S. Matsui (1995) Effects of water table on physiological traits and yield of soybean : I. Effects of water table and rainfall on leaf chlorophyll content, root growth and yield. *Japanese Journal of Crop Science*, 64, 294-303.
- Shimada, S., M. Kokubun and S. Matsui (1997) Effects of water table on physiological traits and yield of soybean : II. Effects of water table and rainfall on leaf water potential and photosynthesis. *Japanese Journal of Crop Science*, 66, 108-117.
- Shimada, S., H. Hamaguchi, Y. Kim, K. Matsuura, M. Kato, T. Kokuryu, J. Tazawa and S. Fujimori (2012) Effects of water table control by Farm-Oriented Enhancing Aquatic System on photosynthesis, nodule nitrogen fixation, and yield of soybeans. *Plant Production Science*, 15, 132-143.
- Shiraiwa, T., T.R. Sinclair and U. Hashikawa (1994) Variability in nitrogen fixation activity among soybean cultivars grown under field conditions. *Japanese Journal of Crop Science*, 63, 111-117.
- Sinclair, T.R., R.C. Muchow, J.M. Bennett and

- L.C. Hammond (1987) Relative sensitivity of nitrogen and biomass accumulation to drought in field-grown soybean. *Agronomy Journal*, 79, 986-991.
- Sinclair, T.R. and R. Serraj (1995) Legume nitrogen fixation and drought. *Nature*, 378, 344-344.
- Sinclair, T.R., L.C. Purcell, C.A. King, C.H. Sneller, P.Y. Chen and V. Vadez (2007) Drought tolerance and yield increase of soybean resulting from improved symbiotic N₂ fixation. *Field Crops Research*, 101, 68-71.
- Sung, F.J.M. (1993) Waterlogging effect on nodule nitrogenase and leaf nitrate reductase activities in soybean. *Field Crops Research*, 35, 183-189.
- 高橋智紀・松崎守夫・塩谷幸治・細川寿 (2005) 転換畑におけるダイズの収量に及ぼす土壌特性の影響. 中央農業総合研究センター研究報告, 51-58.
- 竹田博之・佐々木良治 (2013) 転換畑ダイズ不耕起栽培における地下水水位制御システムを利用した梅雨期および梅雨明け後播種栽培. 日本作物学会紀事, 82, 233-241.
- 谷口健雄 (1992) 加工用バレイショの肥培管理と品質. *日本土壌肥料学雑誌*, 63, 723-727.
- 渡辺祐志・上野達・山神正弘・東田修司 (2003) 土壌窒素供給量に基づいた秋まきコムギの窒素施肥量設定プロセス. *日本土壌肥料学雑誌*, 74, 349-352.
- Weber, C.R. (1966) Nodulating and nonnodulating soybean isolines: I. Agronomic and chemical attributes. *Agronomy Journal*, 58, 43-46.
- Williamson, R.E. and G.J. Kriz (1970) Response of agricultural crops to flooding, depth-of water table and soil gaseous composition. *Transactions of the ASAE*, 13, 216-220.
- Wong, S.C., I.R. Cowan and G.D. Farquhar (1979) Stomatal conductance correlates with photosynthetic capacity. *Nature*, 282, 424-426.

Effects of water table depth control on physiological traits and seed yield of nodulating and non-nodulating soybeans in different soil types.

Shinji Shimada^{*1}, Kazuya Matsuura^{*2} and Shinsaku Fujimori^{*3}

Key words: Nodule nitrogen fixation; photosynthesis; seed yield; soil; soybean; SPAD; water table depth

Summary

This study aimed to analyze the effects of four water table depths (Cont: not controlling water table; WT20, WT40, and WT80: water table was maintained at -20, -40, and -80 cm depth from the soil surface, respectively) and different four soils (GY: Gley soil, GLL: Gray lowland soil, LCA: Light-colored Andosol, SDR: Sand-dune Regosol), on the leaf color (SPAD value), photosynthesis, nodule nitrogen fixation, and seed yield of soybean variety Enrei and its near isogenic non-nodulating line En1282. The SPAD value was largely influenced by both soils and water table management in En1282, whereas it was only slightly influenced in Enrei. The apparent photosynthetic rate (AP) of Enrei was remarkably influenced by water table treatment and tended to be lower for Cont in GY and GLL, whereas it was slightly influenced in LCA and SDR. It seems that stomatal conductance was

involved in the difference. The AP of En1282 was higher in lower water table treatments. The amount of fixed nitrogen tended to be higher for WT40. With GY and GLL, the seed yield was the lowest in Cont and was the highest for WT40, whereas it was lower for WT20 with LCA and was lower for WT80 with SDR. A close relationship was found between the SPAD value at R5 stage and seed yield at maturity in En1282, but not in Enrei. Nitrogen availability from the soil remarkably affects SPAD value, AP and productivity in En1282. The effect of water table control on seed yield varied according to soils and was large for GY and GLL which have relatively lower porosity and water holding capacity; therefore, controlling water table seems to be more important in these kinds of soil property for obtaining higher yield.