

土壌の乾燥は丹波大納言アズキに減収の他、青立ちをもたらすことがある

杉本充¹⁾・梅森勇輝²⁾・安川博之³⁾・黒瀬義孝⁴⁾

(¹⁾ 京都府農林水産技術センター農林センター, (²⁾ 京都府庁, (³⁾ 京都府京都乙訓農業改良普及センター,

(⁴⁾ 農研機構西日本農業研究センター)

要旨：京都府の重要な地域特産作物である丹波大納言アズキは実需者からの評価も高く、安定生産が求められている。そのためにも、気候や土壌水分の変動に対するアズキの環境応答に関する知見の蓄積が必要である。そこで、本研究ではアズキ品種「京都大納言」を供試して、開花前から開花後における時期別の土壌水分の制限がアズキの生育と収量に及ぼす影響について検討した。土壌水分を制限した区で光合成速度の低下が認められ、主茎長や節数が抑制された。開花期前後の土壌水分量の減少は着莢数と粒重を減少させ、減収につながった。一方、土壌水分を制限した後においても、再び土壌に水分が与えられると光合成速度が回復した。開花期前後の時期に土壌水分量が回復すると、光合成速度の回復により子実重の一定の向上につながることを示唆された。さらに、土壌が乾燥した後、湿潤状態に転換したアズキに青立ちがみられた。これは、土壌の乾燥によって莢の減少や根の発達が生じた後、湿潤条件下による光合成速度の回復などによって、ソース過剰となったことから生じたものと推察された。このように、アズキにおいても土壌水分条件に関わる減収と青立ちが発生することが明らかになった。

キーワード：青立ち、アズキ、安定収量、簡易土壌水分計、莢数、丹波大納言、土壌乾燥。

京都府から兵庫県にかけての旧丹波国を中心に栽培されてきた丹波大納言アズキ(以下、丹波大納言)は、普通アズキの百粒重が13 g前後であるのに対し、25 g以上に達する場合もある極大粒のアズキである(国分 2010)。高級和菓子の素材として実需者からの評価も高く、京都府や兵庫県にとって重要な地域特産作物である(山下・江本 1989, 來田ら 2013)。なお、京都府では、丹波大納言の品種「京都大納言」が府の推奨品種に採用され、主要品種となっている。「京都大納言」は、府内で栽培されていた丹波大納言の在来系統から、1981年に純系分離されたものである(京都府 2000)。しかし、産地の過疎、高齢化による生産者の減少に伴って、京都府内では1990年代後半から生産面積や生産量が減少傾向となった(岩川 2014)。そのため、コンバイン収穫を中心とする大規模省力栽培を確立し(大橋 2008, 岩川 2014)、普及を進めている。このように、アズキの生産構造の変化への対応を図ってきたところではあるが、台風や長雨による湿害や高温乾燥による干ばつなど、気象災害を受けての生産意欲の減退も報告されており(岩川 2014)、その克服も重要な課題である。それには、アズキの環境応答に関する生理生態学的な知見の蓄積が必要である。

アズキの気象に対する反応について、北海道で行われた検討はいくつか報告されている(坂東ら 1985, 長岡ら 2004, 竹内ら 2012)。ただし、寒地である北海道のアズキは5月に播種され、7月に開花して9月に収穫される。温暖地である京都府の丹波大納言は、7月に播種され、9月に開花し、11月にコンバイン収穫されるため(京都府農林水産部農産流通課・京都米振興協会 2007)、生育ステージの進展にともなって遭遇している気象条件や土壌水分条件

は、北海道のそれとは異なる。しかし、丹波大納言に対する環境応答、特に土壌水分条件に対する反応についての報告は少ない(山下・江本 1989, 小森ら 2009)。

そこで、開花前から開花後における時期別の土壌水分の制限が、丹波大納言の生育と収量に及ぼす影響について検討し、いくつかの知見を得たので、ここに報告する。

また近年、丹波大納言の栽培圃場において、成熟期に達しても落葉が遅い株が散見される。ダイズでは、成熟期において茎葉の成熟が遅延している状態は青立ちや莢先熟として認識されている(荻原 2002)。機械収穫の際に茎葉汁が子実に付着して汚粒が発生し、品質低下の原因になるものとして(荻原 2002, Satoら 2007)、対策提案が進んでいる(井上 2002)。ダイズの青立ち発生には、シンクの減少をもたらす病虫害を要因とする報告(大塚 1961, 山崎・井上 1993, 竹原ら 2005)の他、気候変動に伴う登熟期間の高温や過乾燥、乾燥後の急激な土壌水分量の変化(佐賀県農業試験研究センター 2005, 山崎ら 2020)などの生育環境に要因があるとする報告も多い。一方、アズキの青立ちや莢先熟は、発生は顕著とされているものの(田村ら 2003)、発生要因や対応に関する報告は、相吉澤(1996)の石灰窒素溶液を用いた落葉と成熟の促進による対策の報告以外に見あたらない。しかし、アズキのコンバイン収穫にあたり、落葉しない、もしくは遅れることは、汚粒発生や刈り遅れによる品質への影響の他、刈刃を入れる高さの見当がつきにくくなる上、作業速度も低下する。ただし現状では、丹波大納言を含むアズキ全般の青立ち発生に関する要因は明らかではなく、京都府の生産現場で実施可能な対策も確立されてはいない。

第1表 圃場試験における試験区構成 (2020年, 2021年).

年次	試験区	処理内容
2020年	前半雨よけ区	8月7日～27日は降雨制限し、畝間灌水も無し。8月27日～9月16日は被覆のない条件下、かつ水分計指示値 ^{a)} が30cm超時に畝間灌水実施。
	後半雨よけ区	8月7日～27日は被覆のない条件下、かつ水分計指示値が30cm超時に畝間灌水実施。8月27日～9月16日は降雨制限し、畝間灌水も無し。
	連続雨よけ区	8月7日～9月16日の間、降雨制限し、畝間灌水も無し。
	対照区	8月7日～9月16日の間、被覆のない条件下に置くとともに、水分計指示値30cm超時に畝間灌水を実施。
2021年	指示値60cm区	7月29日～9月24日の間、降雨制限したが、水分計指示値が60cmの時に畝間灌水を実施。
	連続雨よけ区	7月29日～9月24日の間、降雨制限し、畝間灌水も無し。
	対照区	7月29日～9月24日の間、被覆のない条件下に置くとともに、水分計指示値30cm超時に畝間灌水実施。

2020年圃場試験の播種日は、対照区が7月21日、その他の区が7月22日。2021年圃場試験の播種日は全区7月20日。ハウス内は、試験区処理期間(2020年は8月7日～9月16日、2021年は7月29日～9月24日)以外、灌水は行わず被覆のない条件下に置いた。

a) 簡易土壌水分計(黒瀬2010a, 黒瀬ら2010b)が示す指示値。以下、同じ。

本研究において、アズキにも土壌水分量の変化による青立ちがみられ、その要因検討を行ったので、あわせて報告する。さらにアズキの灌水指標についても、本研究の処理内容及び減収や青立ち発生の結果に基づき、提示を試みた。

なお、青立ちと同様や類似の現象に対して他の報告では、上記の莢先熟(相吉澤1996, 荻原2002, 田村ら2003)や成熟異常(松本ら1986)、成熟不整合(古屋ら1988)とも呼んでいる。本稿では、文献引用部や特定の項目を示すもの以外、当該現象を指す言葉として京都府のダイズ生産現場で一般的な呼称である「青立ち」を用いる。英語名称は、作物学用語集(日本作物学会2000)では莢先熟の訳語としてdelayed stem senescenceが示されているが、上述したように、生産現場では落葉の遅れが作業性等に懸念をもたらしていることから、荻原(2002)が紹介する'delayed leaf senescence'を用いることとする。

材料と方法

アズキ品種「京都大納言」を供試して、2020～2021年の2年間調査を行った。亀岡市にある京都府農林水産技術センター農林センター所内(以下、所内)の地下水位制御システム(以下、FOEAS)が非整備の水田転換畑(中粒質灰色化低地水田土)にて圃場試験を行った。また、2021年は隔離床栽培資材(以下、隔離床)を用いた試験も実施した。以下、その内容を記す。

1. 2020年圃場試験

2020年に所内圃場1筆内に南北方向17m、間口7.4m、高さ3.3mのハウス骨組みを建てた。ハウス内は南北方向で3分割して、第1表に示した試験区の内、「前半雨よけ区」、「後半雨よけ区」及び「連続雨よけ区」を設置し、それぞれの区28m²以上確保した。この3区の土壌水分を制限した。また、ハウスの西隣に「対照区」を設置した。「京都大納言」は、対照区では7月21日、ハウス内では7月22日に1株2粒ずつ手播きで播種を行い、出芽揃後に1本立ちとした。

土壌水分を制限した3区の内、「前半雨よけ区」と「連続雨よけ区」では、展開中の本葉が1～2葉確保された8月7日から、ハウス内を厚さ0.1mmの農業用透明ビニール(三菱ケミカルアグリドリーム株式会社製)で被覆して土壌乾燥処理を開始した。「連続雨よけ区」では着莢期となる9月16日まで被覆を継続した。「前半雨よけ区」では8月7日～9月16日の中間となる8月27日に被覆を除去した。「後半雨よけ区」では8月27日から被覆を開始し、9月16日まで行った。処理期間以外の試験区は被覆のない条件下に置いたが、8月7日～9月16日の間は、畝間に水位5cm程度の灌漑水を通して自然落水させる灌水(以下、畝間灌水)を行うこととした。

灌水を行う指標には、黒瀬(2010a)が開発したポラスカップの空気侵入特性を利用した簡易土壌水分計(株式会社藤原製作所製)を用いた。この簡易土壌水分計は、有効長50mmのポラスカップに内径20mmの透明塩ビ管を異径ソケットで連結させた構造で、ポラスカップの中心が地中20cmの深さになるよう圃場内に設置し、塩ビ管内を水道水で満たしてシリコン栓で蓋を行い使用する(黒瀬ら2010b)。黒ボク土及び灰色低地土において土壌がpF2.8以上の乾燥状態となると、ポラスカップを通じて空気が侵入するため塩ビ管内の水位が低下するが、この水位低下は土壌水分が回復するまで継続する(黒瀬2010a, 黒瀬ら2010b)。このように簡易土壌水分計には土壌乾燥とその継続状況が反映される。使用者は塩ビ管内の水位低下程度を指示値として読み取り、灌水時期の目安とする。京都府では、丹波大納言と並ぶ特産豆類の丹波黒大豆において、簡易土壌水分計の指示値が60cmを超えてなお土壌乾燥が続いた場合は減収することを明らかにした(京都府農林センター作物部2010)。丹波黒大豆の生産現場に対しては、指示値が30cmを超えると灌水の準備をし、60cmに達するまでには灌水を行うように指導している(京都府農林センター作物部2010)。この丹波黒大豆の灌水時期は、目安とする簡易土壌水分計の指示値に30～60cmと幅があるため、本研究のアズキに対しては、この幅の範囲内で土壌水

第2表 隔離床試験における試験区構成(2021年).

試験区	処理内容
開花前灌水制限区	8月24日~9月6日の間、灌水制限を行った.
開花期間灌水制限区	8月30日~9月13日の間、灌水制限を行った.
対照区	灌水は制限しなかった.

2021年隔離床試験の播種日は全区7月29日. 灌水制限期間以外での灌水は、2日に1度の間隔で、1基あたり約 $2.7\text{ L min}^{-1} \times 3\text{分}$ とした.

分がより湿潤状態となっている指示値30 cm超時で灌水を行うこととした. すなわち「対照区」では、被覆のない条件下におき、かつ8月7日~9月16日の間は簡易土壌水分計の指示値30 cm超時に畝間灌水を行うこととし、他の処理区についても雨よけ処理期間以外の時期の畝間灌水は指示値30 cm超時に行うこととした.

栽植密度を条間80 cm × 株間30 cmの 4.2 株 m^{-2} とし、施肥を、当所のアズキ子実栽培の慣行である、「くみあい堆肥入り複合肥料332号」の全層施肥とした基肥のみとした. 成分量は $\text{N:P}_2\text{O}_5:\text{K}_2\text{O}=1.2:5.2:4.8\text{ g m}^{-2}$ である. なお、マルチを敷設せず、その他、病害虫・雑草管理を慣行どおりとし、適宜中耕培土を行った.

2. 2021年圃場試験

2020年に建てたハウスを利用し、南北方向で2分割して、第1表に示した試験区の内、「指示値60 cm区」及び「連続雨よけ区」を設置し、それぞれの区 30 m^2 以上確保した. また、ハウスの西隣に2020年と同様「対照区」を設置した. 「京都大納言」は7月20日に1株2粒ずつ手播きで播種を行い、出芽揃後に1本立ちとした.

ハウス内の2区は、出芽揃の7月29日から子実肥大期の9月24日まで、厚さ0.1 mmの農業用透明ビニールで被覆した. 「指示値60 cm区」では降雨制限を行いつつ、上述した丹波黒大豆の灌水時期の目安では限界値とされる簡易土壌水分計の指示値60 cm時に、2020年と同様の畝間灌水を行うこととした. 「連続雨よけ区」では降雨制限かつ無灌水とした. 「対照区」では被覆のない条件下におき、かつ7月29日~9月24日の間は、簡易土壌水分計の指示値30 cm超時に畝間灌水を行うこととした.

栽植密度を条間80 cm × 株間30 cmの 4.2 株 m^{-2} とし、施肥を、当所のアズキ子実栽培の慣行である、「くみあい堆肥入り複合肥料332号」の全層施肥とした基肥のみとした. 成分量は $\text{N:P}_2\text{O}_5:\text{K}_2\text{O}=1.2:5.2:4.8\text{ g m}^{-2}$ である. なお、マルチを敷設せず、その他、病害虫・雑草管理を慣行どおりとし、適宜中耕培土を行った.

3. 2021年隔離床試験

圃場試験とは異なる雨よけハウス(南北方向8.5 m, 間口5.2 m, 高さ2.8 m. 天井の被覆には、三菱ケミカルアグリドリーム株式会社製の厚さ0.1 mmの農業用透明ビニールを用いた)内に、長辺98 cm × 短辺54 cm, 船形底(中

央深21 cm・両端深17 cm)で排水孔のある隔離床を9基、設置して試験を行った. これらの隔離床に、上面から4 cm程度下の深さまで所内圃場の表土を充填し、長辺方向に株間20 cmの1条播き、隔離床1基あたり5株の「京都大納言」を栽培した. 7月29日に1株2粒ずつ手播きで播種を行い、出芽揃後に1本立ちとした. 隔離床への灌水は播種後から成熟期まで、水道を用いて2日に1度、1基あたり約 2.7 L min^{-1} の水量を3分間与えた. 1回の灌水終了時には隔離床の底から排水が出る状態であった.

試験区は第2表に示すとおり3区設置し、各区3反復(隔離床3基)とした. 処理は、灌水を停止することにより土壌水分を制限した. 制限期間は、「開花前灌水制限区」では、開花期直前の8月24日~9月6日の間、「開花期間灌水制限区」では、開花期を含む8月30日~9月13日の間とした. 病害虫・雑草防除は適宜行ったが、施肥や中耕培土は行わなかった.

4. 調査項目

(1) 気温・降水量・土壌水分関係

気温と降水量データは所内の気象観測露場での観測値を用いた. 試験区の土壌水分データについて、圃場試験では各区1地点、畝中央の頂面から20 cmの深さにDECAGON社(以下、D社)製土壌センサーMPS-2を埋設し、地温と土壌pF値(測定範囲はpF 2~3.71. 以下、pF値)とを計測するとともに、D社製水分センサーEC-5を埋設し、土壌体積含水率(以下、土壌含水率)を計測した. データロガーはD社製Em50を用いたが、その配置の関係で、試験区内でのMPS-2とEC-5の埋設地点は異なった. また、隔離床試験では各区1基の隔離床に、土壌表面から10 cmの深さにD社製水分センサーEC-5を設置し、データロガーにD社製Em5bを用いて土壌含水率を計測した. 全て計測は毎正時の1時間おきとした.

(2) 生育・収量関係

土壌乾燥による影響を把握するため、降雨や灌水の制限を行った期間を含む前後の時期に、生育中の株の主茎長と主茎節数を測るとともに、株式会社マサイントーナショナル製携帯型光合成測定装置MIC-100systemを用いて最上位完全展開葉の個葉光合成速度(以下、光合成速度)を測定した. 測定条件は、量子束密度 $1200\text{ }\mu\text{mol m}^{-2}\text{ s}^{-1}$ 、 CO_2 濃度380~340 ppmとした. 測定株数は、2020年圃場試験では各区10株、2021年圃場試験では8株、2021年隔離床試験では各区2株 $\text{基}^{-1} \times 3$ 反復であった.

収量関係形質については、株全体の9割以上の莢が熟色となった状態を成熟期とし、主茎長、節数、一次分枝数、莢数の計測と、間隔4.75 mm・線径1.6 mmのふるい(株式会社野中理化学器製作所製)による選別で残った子実を精子実として収量と百粒重の測定を行った. 収量と百粒重の算出では、子実含水率を15%に換算した. 圃場試験では各区3畝を選び、その中の連続10株 畝^{-1} を収穫し、それ

第3表 調査期間中の日平均気温の旬別平均値及び旬別降水量(2020年, 2021年).

年次	要素	7月		8月		9月			10月			11月
		下旬	上旬	中旬	下旬	上旬	中旬	下旬	上旬	中旬	下旬	上旬
2020年	平均気温(℃)	25.7	28.2	29.1	28.3	26.8	23.8	20.9	18.3	16.5	13.2	11.9
	降水量(mm)	114.0	0.0	20.0	37.0	40.0	12.0	87.0	84.0	22.0	41.5	42.5
2021年	平均気温(℃)	27.8	27.7	24.0	27.2	23.6	23.1	23.1	22.2	18.3	12.7	13.0
	降水量(mm)	0.0	66.0	340.0	9.0	119.5	41.5	14.0	0.0	19.0	35.5	17.0
平年値	平均気温(℃)	27.0	27.7	27.2	26.0	24.6	23.1	20.7	19.1	16.8	14.4	12.3
	降水量(mm)	39.8	42.8	49.9	56.7	60.8	65.2	65.1	50.6	46.9	41.1	22.0

測定地は、京都府亀岡市内の京都府農林水産技術センター農林センター気象観測露場。平年値について、平均気温は1993~2020年の平均値、降水量は1991~2020年の平均値。

それぞれから収量と収量関係形質データを算出した。隔離床試験では栽培した全ての株である5株基⁻¹から、収量と収量関係形質データを算出した。

青立ち発生の把握については、ダイズ個体の成熟整合性判定に用いられる古屋・梅崎(1993)の方法を参考に、成熟期での各試験区全体について、緑色の莖葉が多く成熟不良な状態を1、落葉が進むなど成熟良好な状態を5として、0.5刻みに評価した。さらに圃場試験では、収量関係形質の調査に用いた株以外の中庸な4株区⁻¹を選び、根の一部を含む部位別乾物重を秤量した。地上部は、落葉を除き、成熟期の株に着生するもののみを採取した。根については、いずれの株も畝に対して縦横30cm×深さ15cmの土壌ごと掘り出して、その範囲に含まれる根を採取することとし、株間の差異が生じないように努めた。

(3) データ処理・統計解析

調査データをMicrosoft Excel 2019(マイクロソフト社)で取りまとめ、分散分析(F検定)によって各処理間の有意性について検討した。2020年圃場試験では、まず初めに、対照区を含めた全4処理区間の平均値について差の有意性について調べた。次に、対照区の平均値と土壌乾燥処理を行った3処理区を込みにした平均値とを比較した。ついで、前半雨よけ区と後半雨よけ区を込みにした平均値と連続雨よけ区の平均値とを比較した。最後に前半雨よけ区の平均値と後半雨よけ区の平均値とを比較した。

2021年圃場試験では、対照区を含めた全3処理区間の平均値について差の有意性について調べた。次に、対照区の平均値と対照区以外の2処理区を込みにした平均値とを比較した。最後に指示値60cm区間の平均値と連続雨よけ区の平均値とを比較した。

2021年隔離床試験では、対照区を含めた全3処理区間の平均値について差の有意性について調べた。次に、対照区の平均値と灌水制限処理を行った2処理区を込みにした平均値とを比較した。最後に開花前灌水制限区間の平均値と開花期間灌水制限区間の平均値とを比較した。

結 果

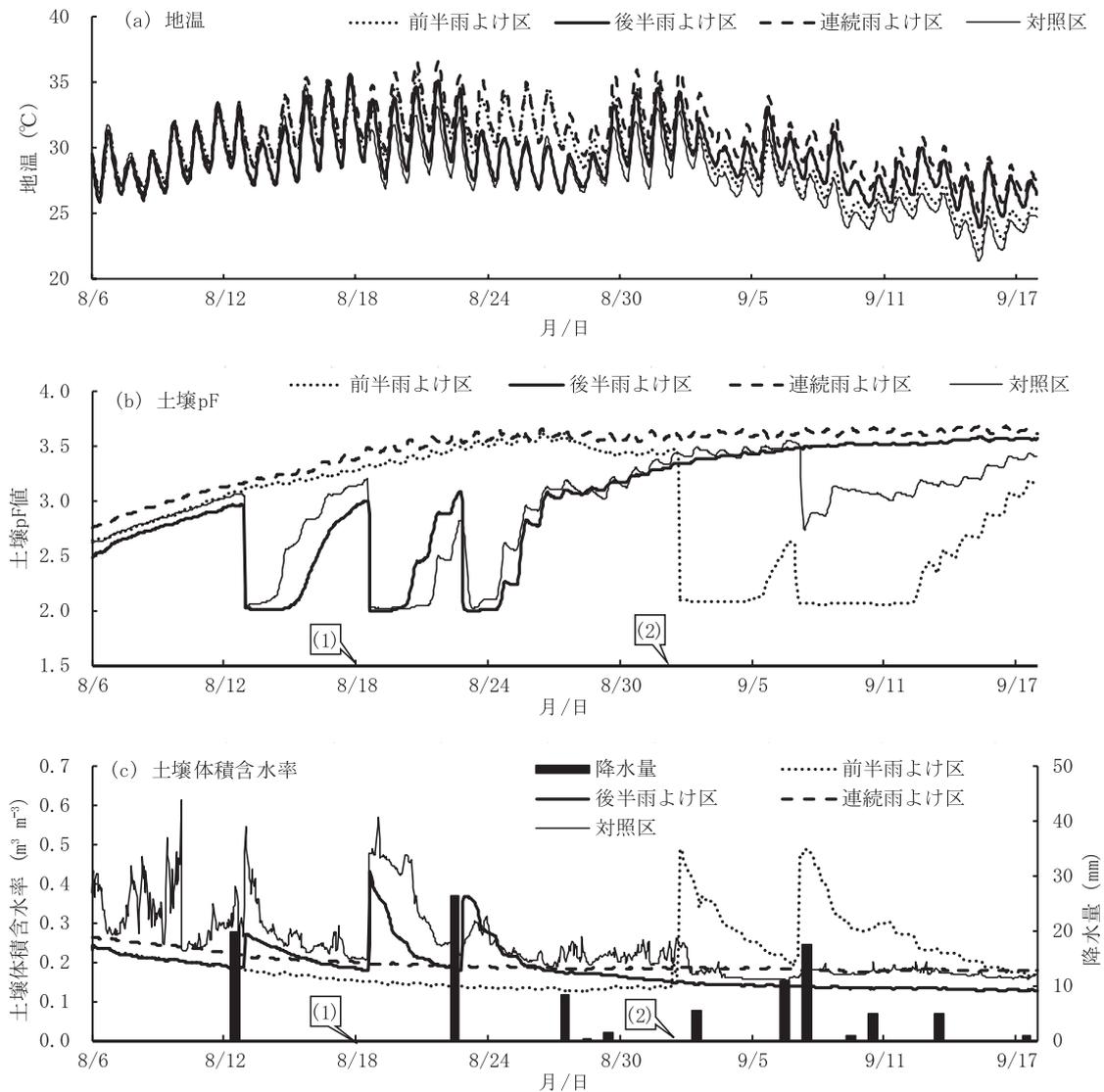
1. 気温・降水量・土壌水分関係

調査期間中の気象概要は第3表に示した。2020年の梅

雨明けは8月1日と平年比12日遅かった。8月の降水量は57.0mmと少なく、平均気温は28~29℃と高かった。9月は、気温は平年より高く、降水は上旬と下旬でまとまった降雨があった。10月の平均気温は平年並みで、降水量は計147.5mmとやや多かった。そのため、梅雨明け前の7月下旬に播種された「京都大納言」は速やかに出芽し、その後の生育も天候面では大きな障害は受けずに進んだ。

2021年は、平年比2日早い7月17日に梅雨が明けた後は降雨がなく土壌の乾燥状態が続いた。8月に入ると徐々に雨の日が多くなり、8月12日~8月20日までは、断続した降雨が続き、土壌は過湿状態であった。8月の降水量は415.0mmと非常に多くなった。一方で8月中旬の気温は低くなった。9月以降は、平均気温が平年並~やや高め、降水量は9月上旬が多く、その後は少なかった。そのため、圃場での「京都大納言」は、播種後の出芽揃いが緩慢となった上、8月の多雨寡照で生育が抑制された。

2020年圃場試験の各試験区の地温と土壌水分の推移を第1図に示した。第1表にあるとおり処理区の降雨・灌水制限は、前半雨よけ区は8月7日~27日、後半雨よけ区は8月27日~9月16日、連続雨よけ区は8月7日~9月16日の間としたが、これらの処理によって土壌乾燥が進んだ試験区で地温が高まり、pF値の上昇と土壌含水率の低下がみられた。連続雨よけ区は処理開始後、漸次、土壌が乾燥し、8月下旬にpF値は3.6、土壌含水率は0.20m³m⁻³以下に達した。前半雨よけ区も処理開始後、漸次、土壌が乾燥し、雨よけ被覆を除去した8月27日にpF値は3.5、土壌含水率は0.13m³m⁻³以下に達した。被覆除去後、8月29日まで合計10.5mmの降水があったが、pF値は3.4、土壌含水率は0.13m³m⁻³と大きな湿潤とはならなかった。pF2.8以上で反応する簡易土壌水分計の指示値が30cmに達した9月1日に畝間灌水を行ったところ、土壌含水率が向上しpF値は大きく低下した。後半雨よけ区は、8月12日に20.0mmの降水があり、土壌が湿潤したが、夏季の高温下により再び急激に土壌乾燥が進んだ。8月18日に、同様の管理をしている対照区の簡易土壌水分計が灌水指示値の30cmに達したため、対照区と後半雨よけ区ともに畝間灌水を施した。その後、後半雨よけ区に被覆を行う8月27日までは、晴天による土壌の乾燥と降雨による土壌の



第1図 地表下20 cmの地温と土壌水分、降水量の推移(2020年圃場試験)。

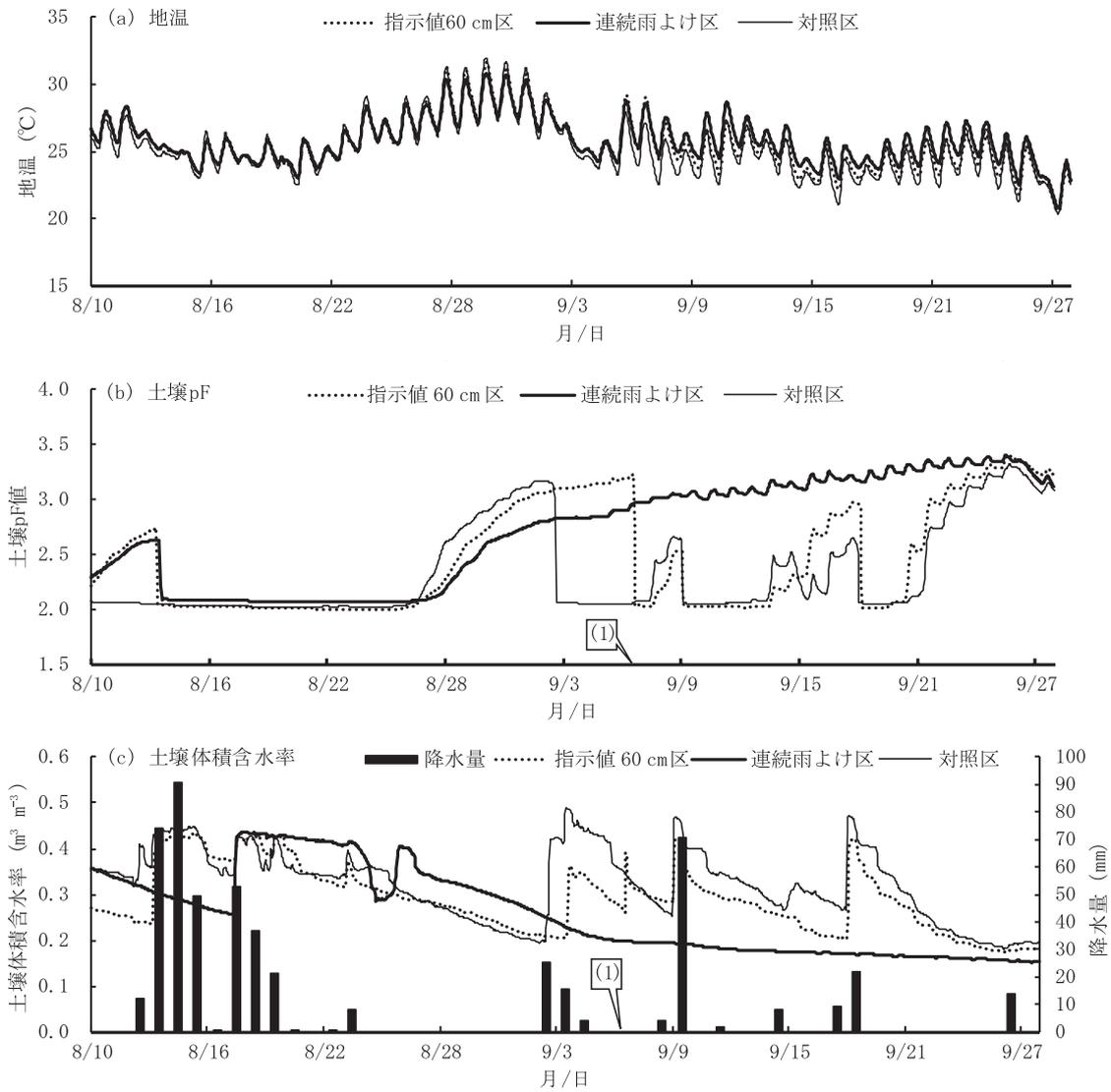
(1)の8月18日に、対照区で水分計の指示値が30 cmに達したため、この時期に雨よけのない対照区と後半雨よけ区を灌水、(2)の9月1日に、指示値が30 cmに達した前半雨よけ区を灌水した。各区の処理期間は第1表を参照のこと。

湿潤がみられた。被覆後の後半雨よけ区は漸次、土壌が乾燥し、処理終了直前の9月14日にはpF値が3.6、土壌含水率は $0.15 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ 以下に至った。

2021年圃場試験の各試験区の地温と土壌水分の推移を第2図に示した。8月26日頃まで、雨よけハウス内の2区(指示値60 cm区・連続雨よけ区)もpF値は測定範囲最低値の2程度、土壌含水率は $0.40 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ 以上を示していたが、前述した8月上中旬の多雨により、ハウス内が湿潤していたためである。そのため、8月26日頃までは処理の効果はみられなかった。その後は天気回復により急激に土壌乾燥が進み、雨よけ処理の影響が現れた。指示値60 cm区は9月6日に畝間灌水を行ったため、土壌水分の上昇がみられた。連続雨よけ区では連続した水分の制限により、漸次、土壌乾燥が進んだ。しかし、処理期間中に至ったpF値は3.3程度、土壌含水率は $0.15 \sim 0.20 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ 程

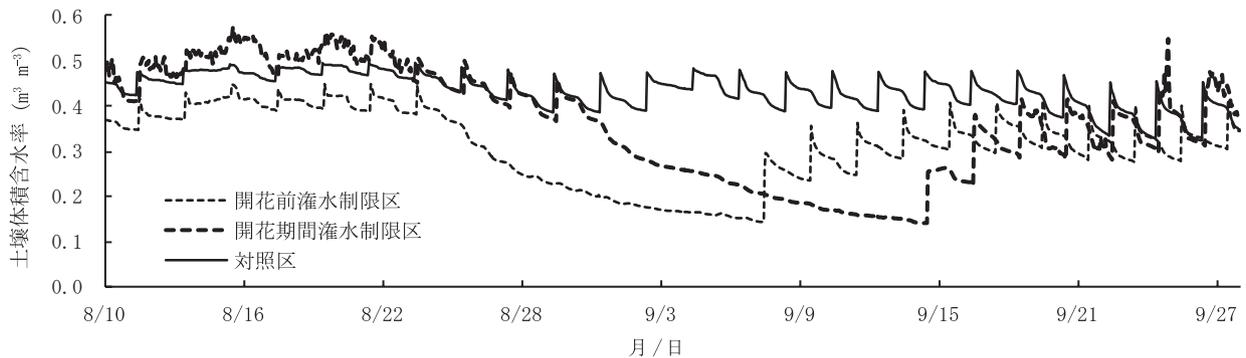
度と、2020年に比べると湿潤傾向で経過した。対照区は指示値30 cmを超えた時に灌水することとしていたが、降雨があったため、灌水は行わずに管理できた。なお、第1図と第2図のそれぞれ、pF値と土壌含水率の動きに違いがみられるところがあるが、両者のセンサーの埋設地点を異にしたため、区内の水分ムラが反映したものと推察した。

2021年隔離床試験での土壌含水率の推移を第3図に示した。隔離床間のばらつきからか、開花前灌水制限区の処理が始まる8月24日までの間、計測データとしては各区の土壌含水率にやや差がみられたが、いずれの区も土壌含水率が概ね $0.40 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ 以上あり、後ほど第5表で示すとおり、アズキの生育に差異はみられなかった。灌水制限を行った区は制限期間中、徐々に土壌水分量の低下がみられ、制限期間終了時の土壌含水率は約 $0.14 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ となった。灌水制限終了後、土壌水分量は上昇し、数日かけて対照区並みとなった。



第2図 地表下20 cmの地温と土壤水分、降水量の推移 (2021年圃場試験)。

(1)の9月6日に、水分計の指示値に達した指示値60 cm区に灌水した。対照区は、指示値が30 cmに達した直後の9月2日から降水があったため、灌水は行わなかった。各区の処理期間は第1表を参照のこと。



第3図 地表下10 cmの土壤体積含水率の推移 (2021年隔離床試験)。

各区の処理期間は第2表を参照のこと。

2. 生育・収量関係

土壌水分制限期間の主茎長と主茎節数は、2020年圃場試験を第4表に、2021年の試験を第5表に示した。2020年圃場試験では、前半雨よけ区と連続雨よけ区の生育抑制が顕著であった。また、後半雨よけ区も対照区に比べ主茎長と主茎節数は小さかった。後半雨よけ区及び連続雨よけ区の処理終了となる9月15日には、連続雨よけ区と同様に後半雨よけ区の生育抑制が認められた。前半雨よけ区は対照区に比べ主茎長と主茎節数とも抑制されていたが、生育は回復傾向であった。2021年圃場試験では、梅雨明け後の乾燥による出芽遅れと8月上中旬の大雨により生育抑制がみられた。しかし、その後の生育には区間差が観察され、9月6日の調査において、指示値60cm区及び連続雨よけ区はと

第4表 土壌水分制限期間の「京都大納言」の主茎長及び主茎節数の推移(2020年圃場試験)。

試験区(略称)	8月26日		9月15日	
	主茎長 cm 株 ⁻¹	主茎節数 節 株 ⁻¹	主茎長 cm 株 ⁻¹	主茎節数 節 株 ⁻¹
前半雨よけ区(前)	17.1	9.0	45.7	15.1
後半雨よけ区(後)	23.0	10.5	39.8	14.8
連続雨よけ区(連)	15.1	9.0	38.2	12.7
対照区(対)	26.8	11.5	51.0	17.9
全4処理区間	**	**	**	**
F検定 前+後+連 vs 対	**	**	**	**
前+後 vs 連	**	*	*	**
前 vs 後	**	**	*	ns

各区10株調査した。**, *はそれぞれ1%, 5%水準で有意差が有り, nsは有意差が無いことを示す(F検定)。

もに主茎長、主茎節数が対照区より抑制されていた。2021年隔離床試験では、いずれの灌水制限区も対照区との有意差は無かった。

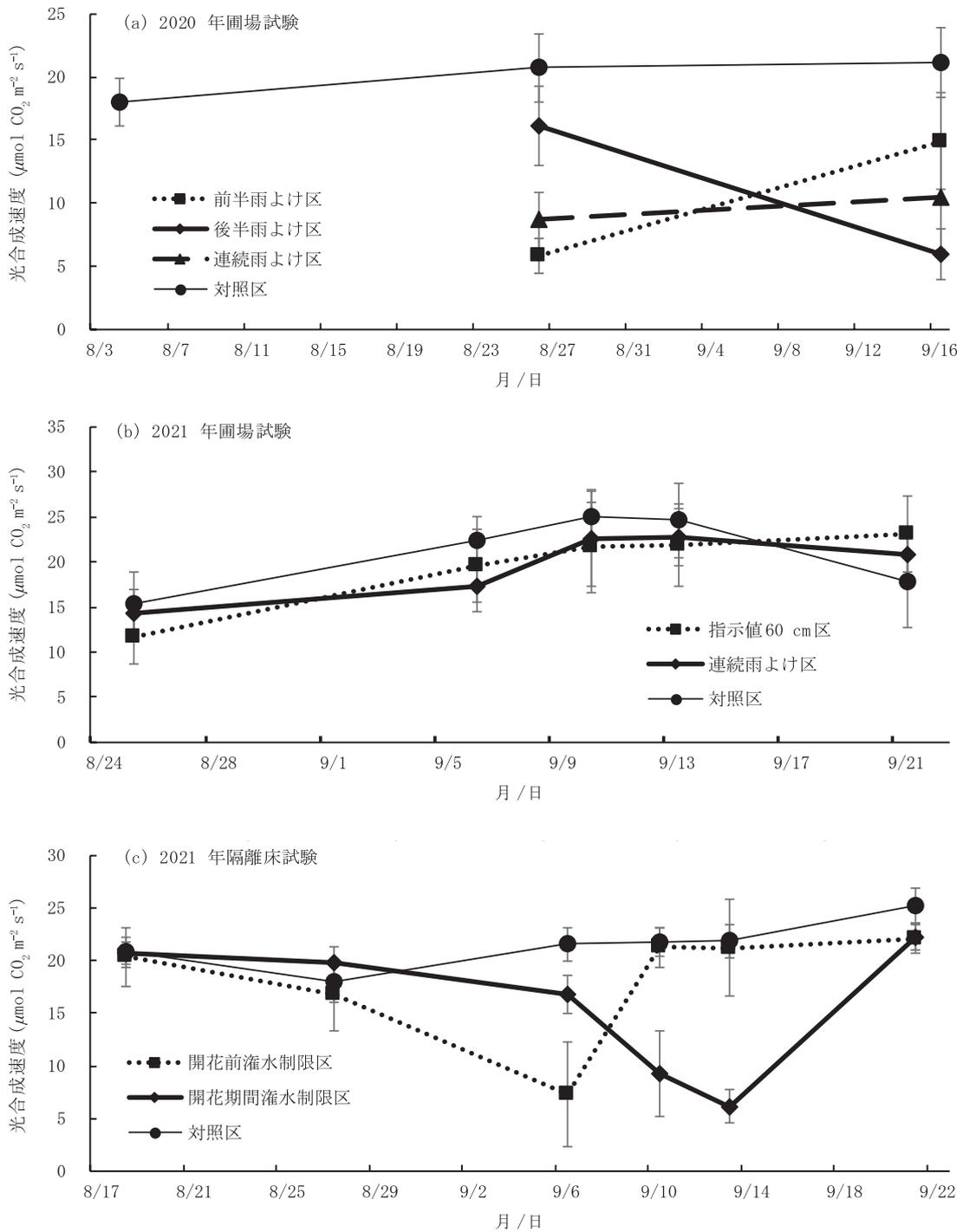
各試験における土壌水分を制限した期間の光合成速度を第4図に示した。第4図(a)の2020年圃場試験では、対照区の光合成速度はいずれの測定日においても約20 $\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ と高い値であった。連続雨よけ区においては制限期間中、10 $\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ 以下と低い傾向であった。前半雨よけ区は、処理終了時には5.8 $\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ と大きく減少したが、土壌水分量が回復した後半処理終了時には14.9 $\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ に回復した。後半雨よけ区では、前半処理終了時には16.1 $\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ であったが、後半処理終了時には5.9 $\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ と低下した。2021年圃場試験については第4図(b)に示したが、処理期間中となる開花期前から莢伸長期の間の各区の光合成速度は、前年とは異なり、土壌水分量に違いがあった9月6日から21日においても、区間差はみられなかった。一方、2021年隔離床試験においては、灌水制限を行った区では制限期間に大きな光合成速度低下がみられ、灌水を再開すると対照区並みに回復した。開花期前灌水制限区の土壌体積含水率が大きく低下していた9月6日は7.3 $\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ で、灌水再開後の9月10日には21.2 $\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ となった。開花期間灌水制限区では、土壌体積含水率が低かった9月13日は6.1 $\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ 、灌水再開後の9月21日には22.1 $\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ となった(第4図(c))。

収穫時の生育と収量関係形質、精子実重は第6表に示した。2020年圃場試験では、最終的な主茎長は対照区に比べ、処理区は有意に短く、後半雨よけ区≒前半雨よけ区>連続雨よけ区の順となった。株あたり総節数も対照区に比べ、処理区は有意に少なく、後半雨よけ区>前半雨よけ区>連

第5表 土壌水分制限期間の「京都大納言」の主茎長と主茎節数の推移(2021年)。

試験場所	試験区(略称)	8月18日		8月25日		9月6日	
		主茎長 cm 株 ⁻¹	主茎節数 節 株 ⁻¹	主茎長 cm 株 ⁻¹	主茎節数 節 株 ⁻¹	主茎長 cm 株 ⁻¹	主茎節数 節 株 ⁻¹
圃場	指示値60cm区(60)	-	-	12.2	6.1	14.9	8.3
	連続雨よけ区(連)	-	-	11.9	6.1	12.3	8.6
	対照区(対)	-	-	11.2	7.0	19.7	10.1
	全3処理区間	-	-	ns	ns	**	*
	F検定 60+連 vs 対	-	-	ns	ns	**	**
	60vs連	-	-	ns	ns	ns	ns
隔離床	開花期前灌水制限区(前)	20.1	5.0	30.2	7.7	33.8	10.0
	開花期間灌水制限区(花)	19.0	5.0	27.8	8.3	37.5	10.8
	対照区(対)	19.3	5.0	26.9	7.3	37.1	10.2
	全3処理区間	ns	ns	ns	ns	ns	ns
	F検定 前+花 vs 対	ns	ns	ns	ns	ns	ns
	前 vs 花	ns	ns	ns	ns	ns	ns

圃場試験は各区8株調査、隔離床試験は各区2株基⁻¹×3基調査。**, *はそれぞれ1%, 5%水準で有意差が有り, nsは有意差が無いことを示す(F検定)。-は、データ無し。



第4図 土壤水分制限期間の「京都大納言」の個葉光合成速度。

エラーバーは標準偏差を表す。各試験の測定株数は、(a) 各区 10 株を測定、(b) 各区 8 株を測定、(c) 各区とも 2 株基⁻¹ × 3 基を測定。

続雨よけ区の順と、生育前半から土壤水分を制限した区がより少なかった。株あたり莢数は、対照区が 56.5 莢と最大であり、続いて前半雨よけ区が 32.2 莢、後半雨よけ区が 30.3 莢とこの両者はほぼ同等で、連続雨よけ区が 14.9 莢となり、前半雨よけ区での回復がみられた。株あたり精子実重は対照区の 54.1 g に対し、前半雨よけ区が 35.3 g、後半雨よけ区が 22.9 g、そして連続雨よけ区が 11.0 g の

順と、開花期を含む期間に土壤水分を制限した区が小さかった。百粒重は対照区に対し、前半雨よけ区は大きく、後半雨よけ区と連続雨よけ区は小さくなった。2021 年圃場試験では、生育と収量関係形質の調査項目について、各区に有意差はみられなかった。しかし、連続雨よけ区の値は対照区より小さかった。2021 年隔離床試験では、主茎長や節数、一次分枝数には有意差がみられなかった。株あたり

第6表 各試験における「京都大納言」の開花期及び成熟期と精子実重, 収量関係係質.

年次 ・ 試験場所	試験区 (略称)	開花期 月/日	成熟期 月/日	主莖長 cm 株 ⁻¹	主莖節数 節 株 ⁻¹	総節数 節 株 ⁻¹	一次分枝数 本 株 ⁻¹	莢数 莢 株 ⁻¹	精子実重 g 株 ⁻¹	百粒重 g	
2020年 ・ 圃場	前半雨よけ区 (前)	9/7	11/3	45.3	15.6	37.2	5.1	32.2	35.3	25.8	
	後半雨よけ区 (後)	9/4	11/5	46.2	16.4	48.8	6.4	30.3	22.9	23.0	
	連続雨よけ区 (連)	9/8	11/2	32.2	12.9	22.6	1.6	14.9	11.0	22.0	
	対照区 (対)	9/3	11/5	63.6	19.2	62.4	7.0	56.5	54.1	24.8	
	F 検定	全4処理区間	-	-	**	**	**	**	**	**	**
	F 検定	前+後+連 vs 対	-	-	**	**	**	†	**	**	*
	F 検定	前+後 vs 連	-	-	*	*	*	**	*	**	**
2021年 ・ 圃場	指示値60cm区 (60)	9/7	11/2	26.0	11.4	19.2	2.2	20.1	15.8	19.9	
	連続雨よけ区 (連)	9/7	11/2	23.8	11.2	17.7	2.1	15.0	12.4	19.7	
	対照区 (対)	9/8	11/2	25.4	11.5	20.1	2.2	21.5	16.0	19.8	
	F 検定	全3処理区間	-	-	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns
	F 検定	60+ 連 vs 対	-	-	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns
2021年 ・ 隔離床	開花前灌水制限区 (前)	9/7	11/2	38.8	11.6	24.3	3.3	21.8	18.7	22.2	
	開花期間灌水制限区 (花)	9/6	11/2	40.1	11.7	24.5	2.6	15.7	11.7	20.2	
	対照区 (対)	9/7	11/2	45.0	11.7	27.5	3.3	24.9	19.2	18.6	
	F 検定	全3処理区間	-	-	ns	ns	ns	ns	**	**	ns
	F 検定	前+花 vs 対	-	-	ns	ns	ns	ns	**	**	ns
F 検定	前 vs 花	-	-	ns	ns	ns	ns	**	*	ns	

2020年圃場試験の播種日は、対照区が7月21日、その他の区が7月22日。2021年の播種期は、圃場試験が全区7月20日、隔離床試験が全区7月29日。調査株数は、圃場試験では各区10株×3畝、隔離床試験では各区5株×3基。子実含水率は15%に換算。**, *, †はそれぞれ1%, 5%, 10%水準で有意差が有り、nsは有意差が無いことを示す (F検定)。開花期と成熟期は検定していない。



(a) 前半雨よけ区

(b) 後半雨よけ区

(c) 連続雨よけ区

(d) 対照区

第5図 成熟期における各試験区の「京都大納言」の状態 (2020年圃場試験)。

莢数は対照区が24.9莢に対し、開花前灌水制限区が21.8莢、そして開花期間灌水制限区が15.7莢と有意に少なかった。しかし、株あたり精子実重については対照区の19.2gに対し、開花前灌水制限区は18.7gでほぼ同等、開花期間灌水制限区は11.7gと少なかった。

2020年圃場試験における成熟期の「京都大納言」を撮影したものが第5図である。前半雨よけ区は、他の区に比べると残葉が多かった。圃場試験における各試験区の成熟整合性程度の評価を第7表に示したが、2020年圃場試験の前半雨よけ区と、2021年圃場試験の連続雨よけ区及び指示値60cm区の成熟整合性程度の値が対照区に比べ低く、成熟が不良であった。また、隔離床試験では区間差はみられ

なかった。

圃場試験において、部位別乾物重の比による残葉と根の量的な評価を、同じく第7表に示した。全乾物重に占める残葉重は、2020年は前半雨よけ区が、2021年は指示値60cm区及び連続雨よけ区が対照区に対し有意に多かった。全乾物重に占める根重は、2020年の雨よけをした3区や2021年の指示値60cm区や連続雨よけ区とも、対照区より多い傾向にあった。

考 察

1. 土壌乾燥の生育, 収量への影響

生育初期の土壌水分不足が莖長や節数などの栄養生長を

第7表 各試験における「京都大納言」の成熟整合性と成熟期での全乾物重及び全乾物重に対する残葉重と根重の比。

年次 ・ 試験場所	試験区(略称)	成熟整合性程度 1:不良~5:良	全乾物重 g	乾物重比		
				残葉重/全乾物重	根重/全乾物重	
2020年 ・ 圃場	前半雨よけ区(前)	1.5	83.0	0.167	0.095	
	後半雨よけ区(後)	4.0	38.7	0.020	0.093	
	連続雨よけ区(連)	4.0	22.4	0.072	0.106	
	対照区(対)	3.5	95.2	0.032	0.061	
	F検定	全4処理区間	-	**	**	ns
	F検定	前+後+連 vs 対	-	**	†	†
	F検定	前+後 vs 連	-	**	ns	ns
2021年 ・ 圃場	指示値60cm区(60)	2.0	33.0	0.214	0.102	
	連続雨よけ区(連)	1.5	30.1	0.272	0.126	
	対照区(対)	3.5	39.4	0.095	0.091	
	F検定	全3処理区間	-	ns	**	†
	F検定	60+連 vs 対	-	ns	**	†
2021年 ・ 隔離床	開花前灌水制限区	2.5	-	-	-	
	開花期間灌水制限区	2.5	-	-	-	
	対照区	2.5	-	-	-	

成熟整合性は区全体の評価。乾物重は各区4株調査。各試験での各調査項目において、**、†はそれぞれ1%、10%水準で有意差が有り、nsは有意差が無いことを示す(F検定)。成熟整合性程度は検定していない、-は、データ無し、または検定結果無し。

抑制することは、ダイズではよく知られている(昆野ら1964, 福井1965)。本研究の「京都大納言」も、生育期間中の主莖長と主莖節数は、圃場試験では兩年とも土壤水分を制限した区で有意に抑制された(第4表, 第5表)。なお、2020年圃場試験では、後半雨よけ区の処理前となる8月26日時点で、後半雨よけ区の主莖長と主莖節数が対照区より小さかった(第4表)。詳細は不明であるが、対照区に比べ後半雨よけ区を含むハウス内の処理区は播種期が1日遅く、出芽揃がやや遅かったことが影響したものと考えられる。2021年隔離床試験で開花直前の9月6日の調査において、有意ではなかったものの、開花前灌水制限区の主莖長が短かった(第5表)。これらから、アズキにおいても土壤水分量の減少により栄養生長の抑制が生じるものと考えられる。

土壤水分量の減少による光合成速度の低下は、2020年圃場試験と2021年隔離床試験でみられたが、2021年圃場試験では対照区と差はみられなかった(第4図)。土壤乾燥に対する豆類の光合成速度の低下については多くの報告があるが(李ら1994, 飛田ら1995, 松波ら2016), 松波ら(2016)の研究では、土壤乾燥にともなうアズキの光合成速度低下は著しいとされる。一方、李ら(1994)によると、ダイズの光合成速度はpF 3.5以下では一定を保ち、それ以上になると急激に低下した。本研究を行った2020年は8月から9月中旬まで高温少雨、2021年は多雨により平年並からやや低温と、気象条件は大きく異なった(第3表)。アズキ

もダイズ同様、土壤水分量の減少による光合成速度の低下が生じる(松波ら2016)。しかし、2021年は2020年に比べると、雨よけ下においても土壤水分量の減少程度が小さく(第1図, 第2図)、李ら(1994)がダイズで明らかにしたような、アズキの光合成速度低下をもたらすpF値に達せず、光合成速度への影響が少なかった可能性が考えられた。

次に、土壤水分量の減少がアズキの収量に及ぼす影響を検討する。山下・江本(1989)は、特に開花前10日間の土壤乾燥は莢数減とダニ発生による減収を著しくさせたことを報告している。ダイズについては、花芽分化期以降の土壤水分不足による減収が生じることは、多くの研究で明らかにされている(昆野ら1964, 福井1965, 齊藤ら1999)。特に齊藤ら(1999)は、花器の分化から子実肥大期までの各ステージ別に土壤水分の欠乏に遭遇すると、花蕾数の減少、花器脱落の助長、不稔実粒の増加、そして百粒重の減少と、生育段階に応じた減収要因がもたらされることを報告している。これらのことを念頭に、開花期を基準に本研究の各試験の処理に対する結果を検討する。

2020年圃場試験では、前半雨よけ区は開花前約30~10日の期間、後半雨よけ区は開花前約10~開花後約10日の期間に水分が制限され、連続雨よけ区はこの2期間通して水分が制限されている(第1表)。成熟期の収量と収量関係形質は、連続雨よけ区が全ての調査項目において最も抑制を受けた(第6表)。他方、前半雨よけ区と後半雨よけ区は主莖長と主莖節数はほぼ同等であった(第6表)。しかし、

後半雨よけ区では前半雨よけ区より総節数は増えたものの、莢数はほぼ同数、精子実重と百粒重は前半雨よけ区を下回っており(第6表)、開花期前後の土壤水分の減少により着莢数と粒重が減少した。また、前半雨よけ区の精子実重と百粒重が後半雨よけ区を上回ったのは、開花期前後からの土壤の再湿潤によって、ストレス状態から脱したことによる光合成速度の回復(第4図)などが寄与したと考えられる。

同様の傾向は2021年隔離床試験でもみられる。この試験では、開花前灌水制限区が開花前13~1日、開花期間灌水制限区が開花前7~開花後7日に灌水の制限を受けた(第2表)。開花前灌水制限区では対照区より莢数は減ったものの精子実重は同等であったのに対し、開花期間灌水制限区では対照区に比べ莢数、精子実重の減少がみられ、開花期後の土壤水分量の減少からもたらされた子実重の減少と考えられた(第6表)。これらの現象は、上記のアズキ(山下・江本1989)やダイズ(昆野ら1964, 福井1965, 齊藤ら1999)での報告などと一致するものである。

2021年圃場試験では、連続雨よけ区は8月下旬から徐々に進んだ土壤乾燥の傾向が9月下旬まで続いたが、指示値60cm区は開花期前日の9月6日に灌水し、土壤水分量が増加した(第2図)。この試験では総節数や莢数、精子実重に有意差はみられなかったが、対照区や指示値60cm区に比べて連続雨よけ区はいずれの値も小さく(第6表)、開花期前後の土壤水分量の減少が減収をもたらすことを否定しない。

これらのことから、アズキもダイズ同様、開花期前後の土壤水分量の減少が減収につながるものと考えられた。

2. 土壤乾燥による青立ち発生

本研究において、土壤水分を制限した区の一部で、成熟期に青立ちが観察され、残葉が多かった(第5図, 第7表)。アズキの青立ち研究は相吉澤(1996)のみと少ないが、ダイズでは荻原(2002)が24報の文献に基づく総説を著している他、荻原(2002)を含む文献解題が出版されて以後も、Satoら(2007)やYamazakiら(2018)などの多くの報告があることから、本稿ではダイズでの報告と比較して検討を進める。

ダイズの青立ちは、シンクの減少(鈴木ら2017)やソースの過剰(Yamazakiら2018)といった、登熟期間中の相対的なソース過剰状態から発生したとする報告が多い(荻原2002)。このことを踏まえて、まず2020年圃場試験の結果を検討する。シンク容量である莢数の区間差をみると、対照区に比べて、土壤水分量が減少した前半雨よけ区と後半雨よけ区、さらに連続雨よけ区の順で少なかった(第6表)。しかし、青立ちが発生し残葉が多かった区は前半雨よけ区のみであった(第5図, 第7表)。したがって、前半雨よけ区のみが特にソース過剰であったものの、他の区は前半雨よけ区ほどのソース過剰ではなかったものと考えられる。

前半雨よけ区は栄養成長期間中に土壤水分量が減少したが、開花期直前以降からは湿潤状態となった(第1図)。また、この時期には光合成速度が回復していた(第4図)。すなわち、前半雨よけ区では、開花期から子実肥大期には土壤が湿潤状態となり、光合成産物の増加によるソース過剰の状態だったと考えられる。これに対し、後半雨よけ区は開花期から子実肥大期において土壤水分量が少なく(第1図)、光合成速度も抑制されていた(第4図)。このことから、大きなソース過剰にはならなかったものと推察される。また連続雨よけ区は、最も莢数が少なく(第6表)、著しいシンク制限を受けていたが、光合成速度は処理区の中で最も抑制されていたものではなかった(第4図)。それにも関わらず、実際には青立ちはみられなかった(第5図, 第7表)。本研究の範囲では、このことを明確に説明できないものの、ソースの一部が莢以外に受容された可能性やソース過剰の閾値に至っていなかった可能性など、アズキの青立ち発生の要因解明にあたって重要な情報が内包された現象と考えられた。

佐賀県農業試験研究センター(2005)では、ダイズの青立ちの一因に、乾燥後の灌水など急激な土壤水分量の変化を挙げている。Satoら(2007)は、開花始から成熟始の間の湿潤によって青立ちが助長されたことを報告している。これらは、本研究のアズキで生じた現象と概ね一致するものである。さらに島田ら(2007)は、摘莢処理して青立ちが著しい有限伸育型ダイズは、根乾物重が増大していることと、根重が大きく根系吸水力が維持されることを報告している。

2020年圃場試験の土壤水分を制限した区では、縦横30cm×深さ15cmの限られた範囲での根の採取ではあるものの、根重/全乾物重の比が対照区より大きかった(第7表)。土壤乾燥条件下は根系を発達させるとしたHirasawaら(1994)や平沢(1995)のダイズの生育条件は、開花期までが土壤乾燥条件で、開花期に十分灌水した後、再び灌水を停止したものである。この条件下でのダイズは、葉の老化が遅かった(Hirasawaら1994, 平沢1995)。これらのことから、土壤水分量の減少下で、莢の減少や根の発達が促された後、一度は湿潤となった場合に、光合成速度の回復や根系吸水力の維持などから、ソース過剰を背景に葉の老化遅延が生じ、青立ちにつながる図式が推察される。

2021年圃場試験では、対照区に比べて雨よけハウス内の2つの処理区は莢数や精子実重の有意な低下はみられなかった(第6表)。しかし、残葉が多く青立ちがみられ、かつ根重/全乾物重の比も大きくなった(第7表)。前項で2021年圃場試験では、2020年圃場試験よりも土壤水分量の減少程度は小さかったことを述べた。だが、この条件下においても根の発達が上にある上、指示値60cm区では9月6日の灌水、連続雨よけ区では9月24日の処理終了後の降雨等で、湿潤となったことにより根の能力が維持され、青立ちに至った可能性が考えられる。

ただし、2021年隔離床試験では青立ちに関しては、区間差は観察されなかった(第7表)。この試験では、隔離床での培地容積が限られることや、灌水制限処理期間以外での灌水量が生育期間中一定であったことから、圃場試験とは異なる条件下により、根の発達や登熟期間中の生育に大きな差が生じなかった可能性が考えられる。しかし、このことの検証を行うことができなかった。安定生産を目指す上で、今後とも、アズキの青立ちについての調査が必要である。

以上、未解明な点も多いものの、本研究での検討から、アズキにおいても土壤水分条件が関わる青立ちが発生することが明らかとなった。本研究でみられた青立ちは、ダイズでも報告があるシンク容量を超えたソース過剰の可能性があると推察され、土壤の乾燥から湿潤への急激な転換も起因していることが考えられた。

3. アズキに対する灌水指標

本研究における圃場試験では、処理期間中に灌水を行う指標として、京都府の黒大豆生産現場で普及している内径20 mmの簡易土壤水分計を用い、黒大豆での指標である指示値30~60 cmを参考に設定した(黒瀬ら2010b, 京都府農林センター作物部2010)。各年次とも対照区は、上記の指示値の範囲に入った直後である指示値30 cm超時に灌水したが(第1表)、両年とも他の区より莢数が多く、多収となった(第6表)。2021年圃場試験では、指示値60 cm区の灌水指標は、区の名称どおり黒大豆の指標の限界値である指示値60 cm時としたが(第1表)、この区には青立ちに至った株が多く(第7表)、正常な成熟とはならないアズキが増えるものと示唆された。すなわちアズキは、黒大豆では許容される範囲よりも狭く、指示値60 cm時での灌水では時機を逸する場合もあると推察される。以上、本研究での範囲からは、簡易土壤水分計の指示値30 cm超時に灌水を行うと、指示値60 cm時での灌水に比べ、アズキの正常な成熟と安定収量が得られる可能性がより高くなると考えられた。ただし、灌水時期の最適期の解明にあたっては、指示値30 cm以下での水準を設定しての検討など、詳細な調査が必要である。

松波ら(2016)によると、アズキはダイズやササゲ、ラッカセイに比べ、蒸散能と吸水能の形態的な平衡性を反映する葉面積/根重比が著しく大きく、形態的に乾燥ストレスを受けやすいとしている。このことは、上記の本研究における結論を支持するものである。また、本研究の結論は、辻(2020)によるFOEAS整備圃場で検討されたアズキの灌水指標と一致し、その根拠を補強するとともに、FOEAS整備圃場、非整備圃場に関わらず一般化できるものと推察された。加えて、青立ち発生の懸念が高まるため、乾燥から湿潤への急激な転換は回避すべきである。栽培期間中は一定の土壤水分条件を維持することが望まれるものと考えられた。

謝辞：日本作物学会和文誌近畿地域編集委員である神戸大学大学院農学研究科の東哲司教授には、投稿前に原稿の御校閲を賜った後、本誌編集委員長に推薦論文としての推挙を行っていただいた。研究の実施にあたり、京都府農林水産技術センター農林センターの中村義弘副主査と井上豊司職員には、試験資材の準備や耕起・整地など栽培管理等の作業を担っていただいた。農研機構西日本農業研究センターの植山秀紀博士、京都府農林水産技術センター農林センターの岡留和伸作物部長と辻康介技師(現在、京都府庁)には、研究推進の上で貴重な御示唆をいただいた。ここに記して謝意を申し上げる。

引用文献

- 相吉澤秀夫 1996. 石灰窒素利用による小豆「丹波大納言」の熟期均一化. 栃木県農業試験場研究成果集 15: 29-30.
- 坂東あかね・由田宏一・後藤寛治 1985. 高温乾燥年におけるアズキの生育相- 冷涼年との比較-. 育種・作物学会北海道談話会報 25: 21.
- 福井重郎 1965. 土壤水分から見た大豆の生理・生態学的研究. 農事試験報 9: 1-68.
- 古屋忠彦・松本重男・嶋正寛・村木清 1988. ダイズ成熟異常個体の地上部諸器官の成熟経過について. 日作紀 57: 1-7.
- 古屋忠彦・梅崎輝尚 1993. ダイズ個体における成熟整合性の簡易判定法. 日作紀 62: 126-127.
- 飛田有支・平沢正・石原邦 1995. 土壤水分低下に対するダイズの生育反応の品種間差. 日作紀 64: 565-572.
- Hirasawa, T. Tanaka, K. Miyamoto, D. Takei, M. and Ishihara, K. 1994. Effects of pre-flowering soil moisture deficits on dry matter production and ecophysiological characteristics in soybean plants under drought conditions during grain filling. Jpn. J. Crop Sci. 63: 721-730.
- 平沢正 1995. 水環境が作物の生理・生態に及ぼす影響. 土壤の物理性 72: 39-46.
- 井上健一 2002. 福井県. ダイズ. 農業技術体系作物編6 ダイズ・アズキ・ラッカセイ. 農山漁村文化協会, 東京. 技 80 の10- 技 80 の14.
- 岩川秀行 2014. 丹波大納言小豆の省力機械化栽培体系の確立. 特産種苗 18: 76-80.
- 国分牧衛 2010. 第19章 アズキ. 新訂食用作物. 養賢堂, 東京. 352-359.
- 小森二葉・大橋善之・大門弘幸 2009. 灌水処理が水田土壌で栽培したアズキの不定根形成に及ぼす影響. 日作紀 78 (別2): 160-161.
- 昆野昭晨・福井重郎・小島陸男 1964. 土壤水分が大豆の体内成分ならびに結莢におよぼす影響. 農技研報 D11: 111-149.
- 來田康男・牛尾昭浩・芦田龍太郎・片岡茂里・藤本周作・竹村雅彦 2013. 栽培方法を異にした丹波大納言小豆の収量・品質に及ぼす播種時期の影響. 作物研究 58: 33-37.
- 黒瀬義孝 2010a. ポーラスカップの空気侵入特性を利用した簡易な土壤水分計の開発. 農業気象 66: 245-253.
- 黒瀬義孝・須藤健一・岡井仁志・河村久紀・土井正彦・本間香貴・K.K. ミシユラ 2010b. 簡易土壤水分計によるかん水時期判定技術. 近畿中国四国農業研究センター研究成果情報 <https://www.naro.go.jp/prolect/results/laboratory/warc/2009/wenarc09-03.html> (2023年1月11日閲覧).
- 京都府 2000. 京都府農業試験研究 100周年記念誌. 京都府, 京都. 16-

17.
京都府農林センター作物部 2010. 簡易土壌水分計でわかる黒大豆の
かん水時期. 平成 21 年度普及に移す試験研究成果. [https://www.
pref.kyoto.jp/nosoken/outcome/documents/21-02.pdf](https://www.pref.kyoto.jp/nosoken/outcome/documents/21-02.pdf) (2023年1月11日
閲覧).
- 京都府農林水産部農産流通課・京都米振興協会 2007. 京の豆栽培の
手引き. 京都府農林水産部, 京都. 1-141.
- 李忠烈・津野幸人・中野淳一・山口武視 1994. ダイズの耐乾性に関
する生理生態学的研究. 第 1 報 土壌水分の減少に伴う葉位別蒸散
速度と光合成速度および根の呼吸速度の変化. 日作紀 63: 215-222.
- 松本重雄・古屋忠彦・松永亮一 1986. ダイズにおける成熟異常個体
の発生実態ならびにその識別基準について. 日作紀 55: 333-338.
- 松波寿典・鄭健鎬・大木行彦・姫野祐子・国分牧衛 2016. 土壌水分
の低下がマメ科作物4種の生理生態に及ぼす影響. 日作東北支部報
59: 5-9.
- 長岡泰良・沢田壮兵・加藤清明 2004. アズキ種皮色に対する登熟期
温度の影響. 日作紀 73: 330-335.
- 日本作物学会 2000. 新編作物学用語集. 養賢堂, 東京. 61.
- 荻原均 2002. 莢先熟. 農林水産研究文献解題 No.27 大豆. 農林統計協
会, 東京. 291-294.
- 大橋善之 2008. 京都府丹後地域における小豆の大規模省力化栽培技
術. 豆類時報 50: 30-35.
- 大塚幹雄 1961. イチモンジカメムシの加害時期と大豆の被害につい
て. 九州病害虫研究会報 7: 51-53.
- 佐賀県農業試験研究センター 2005. 大豆青立ちの発生要因. 九州沖縄
農業研究センター研究成果情報 [https://www.naro.affrc.go.jp/org/karc/
seika/kyushu_seika/2005/2005051.html](https://www.naro.affrc.go.jp/org/karc/seika/kyushu_seika/2005/2005051.html) (2023年1月11日閲覧).
- 齊藤邦行・タリク マハムド・黒田俊郎 1999. 土壌水分の欠乏がダイ
ズの開花結実に及ぼす影響－エンレイと東山 69 号の比較－. 日作
紀 68: 537-544.
- Sato, J., Shiraiwa, T., Sakashita, M., Tsujimoto, Y. and Yoshida, R. 2007.
The occurrence of delayed stem senescence in relation to *trans*-zeatin
riboside level in the xylem exudate in soybeans grown under excess-
wet and drought soil conditions. *Plant Prod. Sci.* 10: 460-467.
- 島田信二・大矢徹治・高橋幹・中村卓司・中山則和・山本亮・島村聡・
金榮厚・服部誠・春口真一・神崎正明 2007. 大豆の青立ち発生に
は成熟期の根系吸水力の維持が関係する. 中央農業総合研究セン
ター研究成果情報 [https://www.naro.affrc.go.jp/org/narc/seika/kanto19/
10/19_10_41.html](https://www.naro.affrc.go.jp/org/narc/seika/kanto19/10/19_10_41.html) (2023年1月11日閲覧).
- 鈴木大輔・飯沼大輔・柴崎さやか・渋谷美奈子・伊藤芳恵・松井大地・
野々川香織・肥後昌男・磯部勝孝 2017. 関東におけるダイズの遅
まき密植栽培が莢先熟の発生と収量に及ぼす影響. 日作紀 86: 347-
357.
- 竹原利明・大藤泰雄・佐藤清之・寺田英生・岩本浩美・見世大作・
長戸玄・宮川久義 2005. 水田輪作ダイズに発生した *Rhizoctonia* 菌
による葉腐れ・青立ち症状について. 日植病報 71: 217.
- 竹内晴信・谷藤健・梶山努・松永裕・三好智明・佐藤仁 2012. 地球
温暖化が道内主要作物に及ぼす影響とその対応方向 (2030年代の
予測) 3. 畑作物における影響予測. 北農 79: 142-153.
- 田村良浩・佐藤孝文・服部誠 2003. 大豆の落葉処理が莢先熟の発生
及び生育・収量・品質に及ぼす影響. 北陸作報 38: 55-57.
- 辻康介 2020. 地下水水位制御システム (FOEAS) を用いた京都府特産
豆類増収技術の確立. 植調 53: 335-339.
- 山下道弘・江本吾勝 1989. 小豆の安定・多収に関する研究. 京都農研
報 14: 1-14.
- Yamazaki, R., Katsube-Tanaka, T. and Shiraiwa, T. 2018. Effect of
thinning and shade removal on green stem disorder in soybean. *Plant
Prod. Sci.* 21: 83-92.
- 山崎諒・川崎洋平・浜口秀生 2020. 子実肥大期以降の高温がダイズ
の青立ちに及ぼす影響. 日本作物学会第 249 回講演会要旨集 : 35.
- 山崎昌三郎・井上健一 1993. カメムシ類の加害によるダイズの青立
ち症状の発生. 北陸病虫研報 41: 89-93.

Effects of Soil Drought on the Growth and Yield of Tamba-Dainagon Adzuki Bean

Mitsuru SUGIMOTO¹⁾, Yuuki TOGAMORI²⁾, Hiroyuki YASUKAWA³⁾ and Yoshitaka KUROSE⁴⁾ (¹⁾Agriculture and Forestry Technology Department, Kyoto Prefectural Agriculture Forestry and Fisheries Technology Center, Kameoka, 621-0806, Japan; ²⁾Kyoto Prefectural Government Office; ³⁾Kyoto Prefectural Otokuni Agricultural Improvement and Growth Center; ⁴⁾National Agricultural Research Center for Western Region, NARO)

Abstract: To stabilize the production of Tamba-Dainagon Adzuki bean, a local specialty crop in Kyoto Prefecture highly valued by consumers, it is necessary to accumulate knowledge on the environmental response of adzuki bean to changes in climate and soil moisture. In this study, we examined the effects of soil drought on the growth and yield of the adzuki bean variety 'Kyoto-Dainagon' at different times from pre-flowering to post-flowering. Soil drought lowered the photosynthetic rate, and decreased the main stem length and node number. Soil drought around the flowering period reduced the number of pods and bean weight, resulting in a decrease in yield. On the other hand, the photosynthetic rate increased after the reduction of soil drought. The reduction of soil drought during the pre- and post-flowering periods was accompanied by an increase in photosynthetic rate, leading to an increase in bean weight. In addition, delayed leaf senescence was observed in adzuki bean that were under a wet condition after the soil had dried out. This is thought to be caused by the excess source of photosynthesis by pod reduction and/or development of root systems under drought due to the recovery of photosynthetic rate under the wet conditions. Thus, it is clear that the yield is reduced and leaf senescence is delayed by soil drought in adzuki bean.

Key words: Adzuki bean, Delayed leaf senescence, Number of pods, Simple soil moisture meter, Soil drought, Stable yield, Tamba-Dainagon.