ポット試験における生育時期ごとの地下灌漑処理が 夏播き秋どりブロッコリーの生育に及ぼす影響

中野有加*・岡田邦彦・佐々木英和

国立研究開発法人農業・食品産業技術総合研究機構 野菜花き研究部門
305-8519 茨城県つくば市観音台

Effects of Sub-irrigation at Different Growth Stages on Growth of Pot-cultured Summer-sowing for Fall-harvest Broccoli (*Brassica oleracea* L.)

Yuka Nakano*, Kunihiro Okada and Hidekazu Sasaki

*Institute of Vegetable and Floriculture Science, National Agriculture and Food Research Organization,
Kannondai, Tsukuba, Ibaraki 305-8519*

Abstract

To utilize the irrigation function of Farm-Oriented Enhancing Aquatic System (FOEAS) in an upland field converted from a paddy field, we examined the effect of sub-irrigation at different growth stages of broccoli and levels of precipitation. Summer-sown fall-harvest broccoli was transplanted in a large pot of andosol or gray lowland soil under rain shelter. The level of feed-water in a connected tank was automatically maintained at -30 cm from the soil surface. Plants were irrigated in each cultivation period (Early, Middle, Late, and Whole periods) under low-level precipitation (25% of monthly average amount of precipitation). By comparing with plants supplied with 25% of the monthly average amount of precipitation, soil water suction in sub-irrigated plots remained low, and plants grew larger. In the Middle and Whole plots, plants had a roughly equal head weight to those in the 100% precipitation plot. The interruption of irrigation at three weeks before harvest improved the preservation of broccoli florets. The effects of sub-irrigation were dependent on the levels of precipitation, and sub-irrigation with 100% precipitation decreased the head weight and shortened the shelf life. The results indicate that sub-irrigation according to the growth stage of plants and rainfall may prevent drought and increase the yield and quality of broccoli.

Key Words : quality, root distribution, soil water, upland field converted from paddy field

キーワード : 土壌水分, 品質, 根系分布, 水田転換畑

緒 言

ブロッコリーは需要が安定し、収穫物が軽量で作業負担の少ない品目であり、栽培の拡大が進められてきた（笠井ら, 1996）。温暖地の水田裏作で栽培されることも多い。野菜全体の作付面積が1994年の60万2,100 haから2014年には47万7,800 haへと21%減少しているのに対し、ブロッコリーの作付面積は8,810 haから1万4,100 haへと60%の伸びを示している（農林水産省, 2014）。

露地野菜は天候によって作柄が変動しやすく貯蔵性も乏しいため、供給量の変動に伴い価格が変動する。国内のブロッコリー産地は、これまでたびたび台風などによる大雨

の被害を受けており、湿害回避のための品種選定や高畝栽培が行われている（塚澤ら, 2009）。一方、ブロッコリーの収量や品質は土壌水分の不足によっても低下することから、海外では灌漑計画が示されている（Erdemら, 2010; Gutezeit, 2004）。しかし、日本の水田転換畑におけるブロッコリー栽培では、定植時の一時的な灌水が行われることもあるが、日常的な水管理は行われていない。この理由として、一般に水田地帯においては、水稻作付け期間以外には用水を利用できず灌漑が不可能である場合が多いこと、畝間灌漑は簡易に実施できるが効率が高い（安養寺, 1990）こと、低地に位置することが多く湿害のおそれがあるため積極的な灌漑がされない（三好, 1973）こと、などが挙げられる。

最近、水田の基盤整備の一手段として、地下水位制御システム（FOEAS : Farm-Oriented Enhancing Aquatic System）が開発された（藤森, 2007）。FOEASは、排水機能に加えて灌水機能をもち、-30 cm ~ +20 cmの任意の地下水位を設定して、積極的な水管理を行うことができる。FOEAS

2016年2月3日 受付. 2016年5月26日 受理.
本報告の一部は園芸学会平成23年度春季大会で発表した.
本研究は、農林水産省委託プロジェクト「水田の潜在能力発揮等による農地周年有効活用技術の開発」3系「土壌養水分制御技術を活用した水田高度化技術の開発」の助成により実施した.
* Corresponding author. E-mail: yuka88@affrc.go.jp

第1図 地下水位制御装置の模式図

による作物の生産性向上について、ダイズで先行して試験が実施され、収量の増大が認められている（片山ら，2013; Shimada ら，2012; 竹田・佐々木，2013）。露地野菜作についても、FOEAS の活用法に関する研究が報告されている（細野ら，2015; 銭本ら，2009）。銭本ら（2009）は、FOEAS の地下水位制御によって土壤水分が安定し、タマネギの鱗茎重が増加することを示した。細野ら（2015）は、ネギ、ブロッコリーとも重粘土 FOEAS 圃場で概ね良好に生育すること、地下灌漑によって表層の土壤水分を高めることで、ブロッコリー苗の良好な活着と初期生育が得られ、増収することを報告した。

ブロッコリーの収量の安定、すなわち花蕾を大きく肥大させるためには、花蕾形成までに葉数を十分に増加させておき、植物体全体の生育を旺盛にする必要がある（藤目・廣瀬，1981）。そして、これら地上部の生育を支える根系も十分に広げさせるように、土壤環境を好適に維持することが重要である。しかし、生育ステージごとの地下灌漑が、茎葉や根系の生育や最終的な花蕾の品質に及ぼす影響に関する知見はない。

そこで本研究では、FOEAS の灌漑機能の活用を想定し、ブロッコリーの増収と品質安定を図るために、異なる生育時期および降水量における地下灌漑の有効性を調べた。なお、実験は降雨の影響を避けるため、雨よけハウス下におけるポット試験とした。

材料および方法

1. 試験地および供試材料

実験は、農研機構野菜茶業研究所つくば野菜研究拠点（茨城県つくば市観音台）の雨よけハウス内の地表に置いた地下水位制御装置（第1図）で行った。この装置は大型プラスチックボックス（内寸：縦 123 cm，横 76 cm，深さ 55 cm）と接続した付設水槽からなる。地下灌漑は、ボールタップによる付設水槽への補給によって行い、地下水位は標準仕様の FOEAS の下限である -30 cm に設定した。地下灌漑と組合せる地表灌水は、生育時期ごとの灌漑効果を調べる実験1では極端な少雨を想定して高層気象台（館野）の月降水量平年値（以下、平年並み降水量）の 25%、根

系の生育を調べる実験2では同 50%，降水量との関係を調べる実験3では同 50%・100%とした。土壌は、つくば市池ノ台畑の淡色黒ボク土（以下、黒ボク土）、および栃木県宇都宮市水田の灰色低地土である。重量法で求めた仮比重は、黒ボク土 0.67，灰色低地土 1.06，砂柱法および加圧板法で求めた $pF1.8 \sim 3.0$ に相当する易有効水分量は、黒ボク土 $56 \text{ L} \cdot \text{m}^{-3}$ ，灰色低地土 $32 \text{ L} \cdot \text{m}^{-3}$ であった。すべての実験において同じ土壌を用い、各実験の前にはソルゴーを栽培して、大型プラスチックボックスごとの土壌の均一化をはかった。

ブロッコリー品種ピクセル（（株）サカタのタネ）を供試した。128 穴セルトレイに育苗用培養土（ナプラ野菜養土 S（標準）タイプ，（株）ヤンマー）を詰めて播種し、ガラス室内で育苗した。毎日 1～2 回底面給水し、播種後 13～15 日目から大塚 A 処方 1/5 単位液を給液した。本葉 3 葉期のブロッコリー苗を各装置に 6 か所、2 株ずつ定植した。定植後、すべての処理区で十分に灌水した。定植約 1 週間後に生育の揃った苗を残して間引き、各装置 6 株とした。同じ処理の装置を 2 個ずつ設け、2 反復とした。施肥は、元肥として CDU 複合燐加安 S555（（株）ジェイカムアグリ， $\text{N-P}_2\text{O}_5\text{-K}_2\text{O}\%$ ：15-15-15）と苦土重焼燐 1 号（（株）小野田化学工業， $\text{P}_2\text{O}_5\%$ ：35）により、 $14 \text{ g N} \cdot \text{m}^{-2}$ ， $25 \text{ g P}_2\text{O}_5 \cdot \text{m}^{-2}$ ， $11 \text{ g K}_2\text{O} \cdot \text{m}^{-2}$ 相当量を施用した。また、NK 化成 2 号（（株）ジェイカムアグリ， $\text{N-P}_2\text{O}_5\text{-K}_2\text{O}\%$ ：16-0-16）により、 $8 \text{ g N} \cdot \text{m}^{-2}$ ， $8 \text{ g K}_2\text{O} \cdot \text{m}^{-2}$ 相当量を 2 回（定植後 15 日目および 28 日目）に分けて追肥した。

2. 土壌および気象環境の計測、生育調査

テンシオメータ（DIK-8333，（株）大起理化工業）を 15 cm 深に埋設し、朝 9 時頃に計測して土壤水分吸引圧を求めた。実験3では、テンシオメータに加え、誘電率土壤水分センサ（EC-5，Decagon Devices, Inc.）を 15 cm 深に水平に埋設し、20 分間ごとに測定し、別途作成した校正式から体積含水率を算出した。

基準蒸発散量（以下、 ET_0 ）（ $\text{mm} \cdot \text{day}^{-1}$ ）は、気象データを用いてペンマン・モンティース法によって推定した。気象データのうち、気温および相対湿度は雨よけハウス内の測定値を、日照時間、気圧および風速は試験地から約

3 km の距離にある高層気象台（館野）の測定値を用いた。作物消費水量（以下、 ET_c ）（ $\text{mm} \cdot \text{day}^{-1}$ ）はFAOガイドライン（Allen ら, 1998）に従い、次式から求めた。

$$ET_c = K_c \cdot ET_0$$

ここで、 K_c は作物係数である。

およそ10日間に1回の頻度で、各区12株について葉齢および最大葉長を計測した。

3. 生育時期ごとの地下灌漑が地上部生育に及ぼす影響（実験1）

2010年7月30日に播種し、8月25日に定植した。地下灌漑処理区として、全期間・25%区（以下、全期間区）（8月25日～10月22日）、前期・25%区（以下、前期区）（8月25日～9月14日）、中期・25%区（以下、中期区）（9月15日～10月5日）、後期・25%区（以下、後期区）（10月6～22日）の4区を設け、各時期に地下水位を-30 cmに設定した。地下灌漑なしの区（以下、地下なし区）として、平年並み降水量の100%および25%相当量を地表に灌水する、地下なし・100%区と地下なし・25%区の2区を設けた。地表灌水は週2回の頻度で行った。地下灌漑処理区においては、地下なし・25%区と同様に地表に灌水した。

半数の個体が収穫適期（花蕾径12 cm以上、あるいは花蕾粒がゴマ粒大から虫ピン頭大（1～2 mm）に揃った頃）に達した区ごとに地上部を採取（10月21～23日）し、頂花蕾を17 cmの長さに調製後、花蕾重、花蕾径およびアスコルビン酸含量、花蕾乾物率、茎葉重を調査した。花蕾のアスコルビン酸含量は、小花および基部を採取し液体窒素で凍結（Herrero-Martínez ら, 1998）後、10%メタリン酸溶液に浸漬してホモジナイザーで破碎し、小型反射式光度計（RQフレックス、（株）メルク）により定量した（山崎・六本木, 2001）。花蕾乾物率は、80°Cで通風乾燥後、乾物重を測定することにより求めた。収穫した花蕾は、冷蔵庫で24時間予冷（5°C）後、恒温器（15°C、相対湿度90%）

に移し、96時間後の花蕾重を測定することにより収穫後120時間における花蕾重減少率を求めた。ブロッコリーの収穫後の鮮度保持効果は、貯蔵温度によって異なる（牛流ら, 1989; Toivonen, 1997）。本実験の温度条件は、ブロッコリーの鮮度保持に関する既往の試験に準じ、予冷は5°C（池田ら, 2001; 尾崎・樋元, 2010）、その後の貯蔵は店頭を想定して15°C（池田ら, 2001）とした。

4. 地下灌漑が根の生育に及ぼす影響（実験2）

2011年8月8日に播種し、9月6日に定植した。これらが実験1および実験3の播種日および定植日と異なるのは、前作の均一栽培（ソルゴー）の残根がブロッコリーの根系計測の妨げとならぬよう、前作後の期間を長くとったためである。地下灌漑処理をほぼ全期間（定植から収穫開始の11月1日まで）に行った全期間・50%区、地下なし・100%区および地下なし・50%区を設けた。地表灌水は5日に1回の頻度で行った。この地表灌水の頻度は、根系計測時の土壌中の水滴による影響をさけるよう、実験1および3の頻度（週2回）よりも減らした。

10月3日（葉齢14）、10月20日（葉齢21）および11月11日（収穫終了頃）に、根系をミニライゾトロン法（里村ら, 2001）により計測した。予め、透明円筒（内径6.4 cm、長さ50 cm）を1区当たり3本ずつ設置し、円筒周囲の画像をミニライゾトロン（In situ root imager CI-600, CID Bio-Science, Inc.）で解像度300 dpiで撮影した。画像中の根長は、解析ソフト（WinRHIZO Tron, Regent Instruments, Inc.）でトレースにより計測した。表層（0～13.7 cm）、中層（13.7～27.4 cm）、下層（27.4～41 cm）の3層に分けて根長を積算した。

5. 降水量および収穫前の地下灌漑の中断が花蕾の品質に及ぼす影響（実験3）

2012年7月30日に播種し、8月20日に定植した。地下灌漑処理区として、全期間区（8月25日～10月22日）と中断区（8月25日～10月2日）を設け、地下なし区と比較した。各処理に地表灌水量100%および50%（いずれも

図2 日持ちの評価（実験3）
 4 収穫時
 3 市場出荷可能
 2 小売り可能
 1 食用可能
 0 食用不可能

第2図 日持ちの評価（実験3）

収穫直後の花蕾を17 cmの長さに調製し、冷蔵庫で24時間予冷（5°C）後、恒温器（15°C、相対湿度85%）に移して貯蔵し、池田ら（2001）の方法を参考として24時間ごとに96時間後まで外観品質を評価した。

外観品質は花蕾の色およびつまみを基準とし、収穫時を4（つまり良、鮮緑色）、市場出荷可能を3（つまりやや不良、緑色）、小売り可能を2（つまりやや不良、緑色の退色わずか）、食用可能を1（つまり不良、一部に黄化あり）、食用不可能（つまり不良、半分以上黄化あり）を0とし、評価2以上を維持する日数を日持ち日数とみなした。

平年並み降水量に対する割合)を設け、週2回の頻度で灌水した。収穫適期に達した植物体の地上部を採取(10月17～22日)し、頂花蕾を17cmの長さに調製後、茎葉重、花蕾重および花蕾径を調査した。

収穫直後の花蕾を冷蔵庫で24時間予冷(5℃)後、恒温器(15℃、相対湿度85%)に移して貯蔵し、池田ら(2001)の方法を参考として24時間ごとに96時間後まで外観品質を評価した。花蕾の色およびつまりを基準とし、収穫時を4(つまり良、鮮緑色)、市場出荷可能を3(つまりやや不良、緑色)、小売り可能を2(つまりやや不良、緑色の退色わずか)、食用可能を1(つまり不良、一部に黄化あり)、食用不可能(つまり不良、半分以上黄化あり)を0とし、評点2以上を維持する日数を日持ち日数とみなした(第2図)。

結 果

1. 生育時期ごとの地下灌漑が地上部生育に及ぼす影響(実験1)

1) 給水量と土壌水分

FAOガイドライン(Allenら, 1998)において、ブロッコリーの標準的な作物係数(以下、 K_c)の値として、0.7(初期段階)～1.05(中間段階)、0.95(最終段階)が示されている。そのガイドラインに沿って本実験の条件により K_c を補正し、初期段階1.15～中期段階0.97、後期段階0.88とした。また、各生育段階は、観測に基づき初期段階10日間(被陰率10%未満)、発達段階30日間(被陰率70～80%まで)、中期段階10日間(葉の黄化開始まで)、後期段階10日間とした。 K_c と気象データから算定した ET_0 により求めた作物消費水量(ET_c)は、夏から秋への季節変化に伴い、8月末の定植直後は約 $6\text{ mm} \cdot \text{day}^{-1}$ と多かったが、9月に入ると徐々に減少し、収穫期の10月下旬には $1\text{ mm} \cdot \text{day}^{-1}$ 程度と小さくなった(第3図A-1, A-2)。栽培期間中の ET_c は、全期間で170mmであり、生育時期ごとの内訳は前期103mm、中期43mmおよび後期24mmであった(データ略)。

地下灌漑量は、いずれの土壌および試験区においても処理開始直後に多く、約1週間後には減少して、その後は10mm以下で推移した(第3図A-1, A-2)。黒ボク土では、処理開始後7日間の灌漑量は処理時期が遅いほど多く、中期区165mm、後期区228mmであったが、灰色低地土では、中期区と後期区ではほぼ同量(それぞれ134mm, 137mm)であった(データ略)。処理時期にかかわらず、処理開始直後を除いて、地下灌漑量は全期間区とほぼ同量で推移した。なお、地下灌漑処理中の各区の地下灌漑量と ET_c の推移は、短期的には似たような傾向を示した。

地下灌漑処理区の積算総給水量は、黒ボク土で灰色低地土の1.2～1.4倍と多かった(第3図B-1, B-2)。積算総給水量を地下灌漑処理間で比較すると、黒ボク土では全期間

区475mm>後期区400mm>中期区354mm>前期区260mmの順に多く、灰色低地土では全期間区378mm>中期区300mm>後期区293mm>前期区211mmの順に多かった。全期間区の地下灌漑量は、地表灌水量(111mm)に対してそれぞれ黒ボク土で3.3倍(364mm)、灰色低地土で2.4倍(267mm)であった(データ略)。

土壌水分吸引圧は、両土壌とも、地下なし・25%区では9月下旬にテンシオメータの測定限界(80kPa)に達し、その後は乾燥がさらに進み測定できなかった(第3図C-1, C-2)。地下なし・100%区でも10月以降土壌水分吸引圧が増加し、黒ボク土では最高76kPaに達したが、灰色低地土では最高53kPaにとどまった。一方、地下灌漑を行うと、土壌水分吸引圧は低下した。全期間区の土壌水分吸引圧は、黒ボク土では生育期間を通じて2kPa以下で推移したが、灰色低地土では初期には低かったものの、10月に入って増加し、最高67kPaに達した。生育時期ごとの地下灌漑処理において、処理開始後の土壌水分吸引圧は、黒ボク土のすべての区、灰色低地土の前期区および中期区では2kPa以下に下がったが、後期区では6kPaとやや高い値であった。地下灌漑を停止すると土壌水分吸引圧は増加し、黒ボク土では11～19日後、灰色低地土では3～9日後には30kPaを超えた。

2) 茎葉の生育

ブロッコリーの葉齢には、いずれの土壌においても処理区間に有意な差はみられなかった(データ略)。最大葉長は初め緩やかに増加し、ついで急速に増加し、やがて伸びが小さくなるというS字型曲線を示した(第3図D-1, D-2)。定植2週間後から地下なし・25%区と後期区で他の処理区よりも小さく推移し、地下なし・25%区ではその差が広がる一方であったが、後期区では地下灌漑開始後その差が縮まった。収穫時の茎葉重は、両土壌とも地下なし・25%区で地下なし・100%区に比べて小さかった(第1表)。地下灌漑処理区の中では、両土壌とも全期間区、中期区および後期区で前期区に比べて茎葉重が大きかった。前期区以外の地下灌漑処理区と地下なし・100%区の茎葉重は、黒ボク土では同程度であり、灰色低地土では地下灌漑処理区でやや小さかった。

3) 花蕾の品質

花蕾重および花蕾径は、両土壌とも全期間区と中期区で地下なし・100%区と同程度に大きかった(第1表)。前期区は全期間区に比べ、両土壌とも花蕾径には差がないものの花蕾重が小さかった。後期区の花蕾重と花蕾径は灰色低地土では全期間区と差がなかったが、黒ボク土では全期間区よりも小さかった。花蕾小花部のアスコルビン酸含量には処理による差はみられなかった。花蕾基部のアスコルビン酸含量は、地下なし・25%区で他の区よりも大きかった。花蕾乾物率は、両土壌とも地下なし・100%区で最も低く、地下なし・25%区で最も高かった。黒ボク土における花蕾乾物率は、全期間区で地下なし・100%区と同程度

第3図 生育時期ごとの地下灌漑処理および地表灌水量が地下灌漑量および作物消費水量 (ET_c) (A-1: 黒ボク土, A-2: 灰色低地土), 積算総給水量 (B-1: 黒ボク土, B-2: 灰色低地土), 土壌水分吸引圧 (C-1: 黒ボク土, C-2: 灰色低地土) およびブロッコリーの最大葉長 (D-1: 黒ボク土, D-2: 灰色低地土) に及ぼす影響 (実験1)

A: 地下灌漑量は各区2反復の5日間の移動平均, ET_c は5日間の移動平均

B: 各区2反復の5日ごとの平均値

C: 各区2反復の3日間の平均値, 図中の矢印は, 以降は乾燥のため測定不能となったことを示す

D: 各区12株の平均値, 縦棒は標準偏差

に低く, 地下灌漑処理時期が早いほど高かった. 灰色低地土では, 前期区と地下なし・25%区で他の区よりも花蕾乾物率が高かった. また, 収穫後120時間の花蕾重減少率は, 地下なし・25%区で8.5% (黒ボク土), 6.2% (灰色低地土) と大きかったが, 他の区では1%台で差がみられなかった.

2. 地下灌漑が根系分布に及ぼす影響 (実験2)

土壌水分吸引圧は, 地下なし・100%区では両土壌とも

10月下旬にやや上昇したが, 黒ボク土で最高25 kPa, 灰色低地土で最高37 kPaにとどまった (第4図). 地下なし・50%区では黒ボク土で10月上旬, 灰色低地土で10月中旬に, テンシオメータの測定限界 (80 kPa) を超えた. 一方, 全期間・50%区においては, 両土壌とも土壌水分吸引圧は低く維持された.

両土壌とも, すべての計測日において, 0~41 cm 深の総根長に処理による差はみられなかったが, 全期間・50%

第1表 ブロッコリーにおける地下灌漑処理および地表灌水量が収穫時の生育量と花蕾の品質に及ぼす影響

土壌	処理区 (地下灌漑・地表灌水量)	新鮮重 ^z (g)		花蕾径 ^z (cm)	アスコルビン酸含量 ^y (mg・100gFW ⁻¹)		花蕾 乾物率 ^{xy} (%)	花蕾重 減少率 ^{wxy} (%)
		茎葉	花蕾		小花部	基部		
黒ボク土	地下なし・100%区	1258.3 a ^v	211.9 ab	9.8 ab	93 a	63 b	8.9 c	1.4 b
	地下なし・25%区	456.5 c	102.2 c	5.4 c	80 a	103 a	12.6 a	8.5 a
	全期間・25%区	1350.4 a	249.7 a	11.7 a	81 a	68 b	8.7 c	1.4 b
	前期区・25%区	849.1 b	179.4 b	10.0 ab	84 a	70 b	12.5 a	1.5 b
	中期区・25%区	1281.3 a	218.0 ab	10.8 ab	78 a	55 b	9.9 b	1.5 b
	後期区・25%区	1342.2 a	190.4 b	8.9 b	79 a	53 b	8.0 d	1.4 b
灰色低地土	地下なし・100%区	1196.6 a	174.4 a	9.8 a	95 a	64 b	10.7 b	1.4 b
	地下なし・25%区	387.5 d	65.0 c	2.8 c	79 a	113 a	13.0 a	6.2 a
	全期間・25%区	965.5 b	164.6 a	9.4 ab	75 a	68 b	10.6 b	1.2 b
	前期区・25%区	672.1 c	127.9 b	7.6 b	82 a	79 b	12.7 a	1.5 b
	中期区・25%区	973.2 b	165.4 a	8.9 ab	96 a	69 b	10.0 b	1.8 b
	後期区・25%区	965.8 b	142.3 ab	7.5 b	76 a	64 b	9.4 b	1.4 b

^z 9～12個体の平均値^y 4個体の平均値^x 逆正弦変換値を用いた分散分析に基づき多重比較検定を行った^w 収穫直後の花蕾を17cmの長さに調製し、温度5℃の冷蔵庫で24時間予冷後、温度15℃・相対湿度90%の恒温器で96時間貯蔵し、貯蔵前後における花蕾重から収穫120時間の重量変化を算出^v 同じ文字間にはTukey-Kramer法により5%水準で有意差がないことを示す 第4図 地下灌漑処理および地表灌水量が土壌水分吸引圧（左：黒ボク土，右：灰色低地土）に及ぼす影響（実験2）
各区2反復の3日間の平均値，図中の矢印は、以降は乾燥のため測定不能となったことを示す

区で地下なし・100%区よりも表層の根長が長かった（第5図）。一方，下層には地下なし・100%区および地下なし・50%区で根が伸びていたのに対し，地下灌漑を行った全期間・50%区では根がほとんど伸びなかった。すなわち，地下なし・100%区および地下なし・50%区では，0～41cm深のうちの深さによる根長分布の違いは小さかったのに対し，全期間・50%区では最終計測日（11月11日）には6割以上が表層に分布するという偏りがあった。

3. 降水量および地下灌漑の収穫前の中断が花蕾の品質に及ぼす影響（実験3）

1) 給水量と土壌水分

地下灌漑処理区の積算総給水量は，黒ボク土で灰色低地土の1.1～1.2倍と多かった（第6図A-1，A-2）。両土壌とも，地下灌漑量は全期間・50%区で全期間・100%区の

3倍程度と多くなり，積算総給水量は降水量が異なっても同程度であった。地下灌漑量は，地表灌水量に対して全期間・50%区では黒ボク土で1.3倍，灰色低地土で0.9倍，全期間・100%区では両土壌とも0.2倍であった。地下灌漑の中断（10月3日）による積算総給水量の減少は，中断・100%区では黒ボク土4mm，灰色低地土6mmとなり，中断・50%区の黒ボク土83mm，灰色低地土48mmと比べて少なかった。

土壌水分吸引圧は，地下なし・50%区で両土壌とも9月中旬に，テンシオメータの測定限界（80kPa）を超えた（第6図B-1，B-2）。また，地下なし・100%区でも黒ボク土で10月上旬に56kPaを示したのち（第6図B-1），80kPaを超えた（データ略）。一方，地下灌漑処理区においては，土壌や地表灌水量にかかわらず，灌漑期間中の土壌水分

第5図 地下灌漑処理および地表灌水量が層ごとの根長に及ぼす影響 (実験2)

計測日 A : 10/3, B : 10/20, C : 11/11

地中に埋設した透明円筒周囲の画像を表層 (0 ~ 13.7 cm), 中層 (13.7 ~ 27.4 cm), 下層 (27.4 ~ 41 cm) に分けて計測
各区3反復の平均値

総根長 (大文字) 層ごと (小文字) の同じ文字間には Tukey 法により 5%水準で有意差がないことを示す

吸引圧は低く維持された。地下灌漑を中断すると徐々に土壤水分吸引圧が上昇し、中断・50%区では黒ボク土で 38 kPa, 灰色低地土で 18 kPa まで上昇した。中断・100%区における土壤水分吸引圧の上昇はわずかであった。体積含水率は、地下なし・100%区では両土壤とも栽培期間中に約 $0.2 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$ 減少し、終了時には黒ボク土で約 $0.6 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$, 灰色低地土で約 $0.5 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$ の値となった (第6図 C-1, C-2)。地下なし・50%区の体積含水率の低下は地下なし・100%区に比べて急激であったが、最終的な値はそれぞれの土壤で地下なし・100%区とほぼ同じであった。灌漑中断後における体積含水率は、黒ボク土の中断・50%区と灰色低地土の両中断区ではそれぞれ約 $0.1 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$ 減少したが、黒ボク土の中断・100%区ではほとんど減少しなかった (第6図 C-1, C-2)。

2) 茎葉の生育

収穫時の茎葉重は、両土壤とも地下なし・50%区では地下なし・100%区に比べて小さかった (第2表)。同じ地表

灌水量で地下灌漑の有無によって比べると、地表灌水量 100%では、黒ボク土で全期間区が地下なし区よりも小さく、灰色低地土では両者に差がなかった。一方、地表灌水量 50%では、両土壤とも全期間区が地下なし区よりも大きかった。また、いずれの土壤、地表灌水量とも、同じ地表灌水量では全期間区と中断区で茎葉重に差はみられなかった。

3) 花蕾の品質

両土壤とも、地下なし・50%区は地下なし・100%区に比べて花蕾重と花蕾径が小さかったが、日持ち日数に差はみられなかった (第2表)。土壤および地表灌水量ごとで地下灌漑の中断の影響をみると、花蕾重および花蕾径、日持ち日数のいずれの項目においても差はみられなかった。積算総給水量の最も少ない地下なし・50%区と最も多い全期間・100%区を比べると、両土壤とも茎葉重、花蕾重、花蕾径、日持ち日数のすべての項目において全期間・100%区の方が劣っていた。

第6図 地表灌水量および地下灌漑の収穫前の中断が積算総給水量 (A-1: 黒ボク土, A-2: 灰色低地土), 土壌水分吸引圧 (B-1: 黒ボク土, B-2: 灰色低地土) および体積含水率 (C-1: 黒ボク土, C-2: 灰色低地土) に及ぼす影響 (実験3)

A: 各区2反復の5日ごとの平均値

B: 各区2反復の3日間の平均値, 図中の矢印は, 以降は乾燥のため測定不能となったことを示す

C: 各区3つのセンサで20分ごとに測定した値の3日間の平均値, 9月25~27日は欠測あり

考 察

1. 地下灌漑による土壌への水分供給

夏播き秋どりブロッコリーの栽培期間である夏から秋にかけては, 日射量や気温が低下し, 基準蒸発散量 (ET_0) が減少する時期である. また, 本実験の栽培環境では作物係数 (K_c) についても, FAOガイドライン (Allen ら, 1998) に基づく補正により, 生育が進むにつれて 1.15 から 0.88 まで減少した. 従って, ET_0 に K_c を乗じて推定する ET_c は, 地下灌漑処理の早い時期ほど大きかった (第3図 A-1, A-2). 加藤ら (1965) は畑圃場における夏播き秋どりカリフラワーの作物蒸散量をチャンバー法で測定し, $1.8 \text{ mm} \cdot \text{day}^{-1}$ (8月, 以下単位同じ), 4.7 (9月), 3.7 (10

月), 3.7 (11月) の値を得ている. 一般に, 生育初期には作物蒸散量は小さく ET_c の大部分を土面蒸発量が占め, 葉面積が増大するにつれて土面蒸発量は減少し, 作物蒸散量の割合が増える.

地下灌漑は, ポット内の水分消費に伴う地下水位の低下に応じて付設タンクから給水した. 実験1における平年並み降水量の25%相当の少雨条件下ではポットからの排水はなかったため, 地表灌水量と合わせた総給水量は ET_c とほぼ等しくなるはずである. しかし, 両土壌とも総給水量は ET_c を大きく上回った (第3図 A). これは, 総給水量はポットの面積当たりで算出しているのに対し, 地表に置かれたポットが周囲の熱を吸収すること, ブロッコリーの葉がポットの面積以上に広がることにより, ET_c を過小に

第2表 ブロッコリーにおける地下灌漑処理および地表灌水量が収穫時の生育量と花蕾の品質に及ぼす影響^z

土壌	処理区 (地下灌漑・地表灌水量)	新鮮重 (g)		花蕾径 (cm)	日持ち日数 ^y (日)
		茎葉	花蕾		
黒ボク土	地下なし・100%区	1453.1 a ^x	227.8 a	10.3 a	4.4 ab
	地下なし・50%区	667.4 c	128.6 c	6.6 b	4.7 a
	全期間・100%区	1144.9 b	158.7 bc	9.5 a	3.5 b
	全期間・50%区	1230.5 ab	158.4 bc	9.5 a	3.8 ab
	中断・100%区	1124.4 b	171.0 b	9.5 a	3.8 ab
	中断・50%区	1160.6 b	183.5 b	9.3 a	4.4 ab
灰色低地土	地下なし・100%区	1069.9 a	174.1 a	9.4 a	3.9 ab
	地下なし・50%区	572.8 b	108.7 c	5.1 b	4.3 a
	全期間・100%区	872.8 a	149.0 b	9.1 a	2.8 b
	全期間・50%区	947.9 a	154.8 ab	8.7 a	3.1 ab
	中断・100%区	880.5 a	162.2 ab	8.8 a	3.6 ab
	中断・50%区	952.7 a	175.4 a	9.1 a	3.5 ab

^z 9～12個体の平均値^y 収穫直後の花蕾を17cmの長さに調製し、冷蔵庫で24時間予冷(5℃)後、恒温器(15℃, 相対湿度85%)に移して貯蔵し、池田ら(2001)の方法を参考として24時間ごとに96時間後まで外観品質を評価した。花蕾の色およびつまりを基準とし、収穫時を4(つまり良, 鮮緑色), 市場出荷可能を3(つまりやや不良, 緑色), 小売り可能を2(つまりやや不良, 緑色の退色わずか), 食用可能を1(つまり不良, 一部に黄化あり), 食用不可能(つまり不良, 半分以上黄化あり)を0とし、評点2以上を維持する日数を日持ち日数とみなした^x 同じ文字間にはTukey-Kramer法により5%水準で有意差がないことを示す

算定したものと考えられる。従って、総給水量の値をそのまま作物の必要水量とみなすことはできない。しかし、土壌の違いおよび地下灌漑処理の時期による地下灌漑量の推移については比較できる。

実験1の地下灌漑処理区における地表灌水量は平年並み降水量の25%と少なく、中期区および後期区では地下灌漑開始時の土壌水分は低くなっていたが、灌漑開始とともに土壌水分吸引圧が低下した(第3図C)。実験2(第4図)および実験3(第6図B)においても、地下灌漑により土壌水分吸引圧が低く維持された。

地下灌漑の強度は、同じ設定水位でも土壌によって異なり、灰色低地土では黒ボク土に比べて地下灌漑量が少なく、土壌水分吸引圧があまり下がらなかった(第3図A, B, C)。この傾向は、土壌乾燥が進んだ後期の処理ほど顕著であった。地下水面から根域への水の毛管上昇速度は、土壌タイプによって規定される(Raes・Deproost, 2003)。灰色低地土は黒ボク土に比べて毛管上昇速度が小さく、さらに土壌水分吸引圧の増加とともに低下する(長谷川, 1986)。これらのことから、本実験では、地下灌漑の時期が遅れるほど土壌の乾燥が進み、地下水面から表層への毛管上昇が減るため、灌漑量が少なかったと思われる。従って、灰色低地土で土壌が極度に乾燥している場合の地下灌漑では、低水位では作土への水分供給が難しいため、設定水位を高くする必要がある。

2. 生育時期ごとの土壌水分とブロッコリーの生育・収量の関係(実験1, 3)

ポーランドでの夏播き秋どりブロッコリー栽培で土壌水

分吸引圧30kPaを灌漑開始点として灌漑をすると、降雨のみの場合に比べて植物体重および可販収量が大きかった(Babik・Elkner, 2002)。実験1において土壌水分吸引圧が30kPaを超える時期の生育ステージは、前期区では栄養成長期後半から収穫期まで、中期区では栄養成長期前半と花蕾肥大期後半、後期区では栄養成長期前半から花蕾肥大期前半までに当たる(第3図C)。収穫時の茎葉重は、すべての地下灌漑処理区で地下なし・25%区よりも大きかった(第1表)。一方、実験3において、収穫3週間前の地下灌漑処理の中断によって土壌水分吸引圧はあまり上昇せず、茎葉重には影響を及ぼさなかった(第6図B, C, 第2表)。ブロッコリーの花蕾重は、成熟した植物体の栄養成長量と直線的な正の相関を示すことが報告されている(Díaz-Pérez, 2009)。実験1～3の全処理区について収穫時の葉重および茎重と花蕾重とをプロットした(第7図)。区ごとの測定値数が異なるので、これを考慮して重み付けを行った相関係数を求めると、葉重と花蕾重の間には0.89、茎重と花蕾重の間には0.73と、それぞれ高い正の相関関係が認められた($P<0.001$)。すなわち、地下灌漑処理によって土壌に水分を供給することで栄養成長が旺盛となり、花蕾収量の確保につながると考えられる。

生育時期別の灌漑効果をみると、実験1で地下灌漑処理区のうち花蕾重および花蕾径ともに大きいのは全期間区と中期区であり、両区で共通して土壌水分吸引圧が30kPa以下の期間は9月中旬から10月上旬である(第1表, 第3図C)。また、アスコルビン酸含量、花蕾乾物率および花蕾重減少率のいずれの点でも、全期間区と中期区では地下

第7図 収穫時の葉重および茎重と花蕾重との関係 (実験1～3)

プロットは区ごとの平均値 ($n=6\sim12$) を示す。葉重および茎重と花蕾重との相関係数は、区ごとの測数値数を考慮して、重み付けを行って求めた。

なし・100%区と同程度で特に品質上の問題はなかった。黒ボク土の後期区は、茎葉重が全期間区および中期区と同程度に大きかったが、花蕾重が全期間区に比べて小さかった。Wurr ら (2002) は、花芽分化開始直後 (花蕾径 5 mm) から2週間の水ストレス処理が花蕾重を減少させるとともに、日持ち性を低下させることを示した。実験1の作型における花芽分化時期は、定植約3週間後 (9月中旬) で中期区の処理開始時に当たる。従って、花芽分化直後のストレスに敏感な時期に灌漑効果が高いと考えられる。

収穫3週間前に地下灌漑を中断 (実験3) し、地下灌漑処理区のうち総給水量が最も少なかった中断・50%区では、総給水量が最も多かった全期間・100%区よりも灰色低地土で花蕾重が大きかった (第2表)。生育期間中の過剰な水分供給は、ブロッコリーの収量を減少させる (Erdem ら, 2010; Gutezeit, 2004)。Gutezeit (2004) は有効水分量の75%、55%および35%を灌水開始点としてブロッコリーを栽培し、灌水量が多いほど地上部重が小さいことを示し、その原因は過剰水分による根の酸素欠乏であると推察している。従って、過剰な灌漑は、花蕾の収量および品質に対してむしろマイナスに作用すると思われる。逆に、全生育期間にわたって低水分条件 (20 cm 深の土壤水分吸引圧 400 kPa) で栽培したブロッコリーは、高水分条件 (圃場容水量) と比べ収穫後の花蕾の緑色や抗酸化活性が長く維持される (Cogo ら, 2011)。花蕾形成期間の一時 (14日間) に強い水ストレス (土壤水分吸引圧 600 kPa 以上) を与えると、その時期が遅いほど花蕾重は小さくなるが、茎の膨圧および緑色の保持の点で無処理区よりも日

持ちが長くなる (Wurr ら, 2002)。本実験では、灌漑の中断によって徐々に水ストレスがかかり、最大土壤水分吸引圧 40 kPa 以下とその強度も弱かった。従って、花蕾の収穫前に弱い水ストレスを与えることで、花蕾の収量を低下させずに日持ち性を向上できる可能性がある。

3. 地下灌漑が根系分布に及ぼす影響 (実験2)

Thorup-Kristensen (1993) は、ミニライゾトロン法でブロッコリーの根系を深さ 10～112 cm まで調べ、根系分布は前作の作物により異なり、112 cm 深以下にも伸長するが、共通して根長密度が高い層は 10～50 cm 深であった。Allen ら (1998) は、ブロッコリーの主な根系の深さは 30～46 cm であり、最大有効根系深さを 30～40 cm であるとしている。本実験の全期間の地下灌漑によって、ブロッコリーの総根長は変化しなかったものの、表層に多く下層に少なく分布した (第3図)。地下水面に近いほど土壤の気相率が低くなるため根の伸長が不可能になり (石川ら, 1973)、根系分布は表層に偏る。地下灌漑によって表層に発達した根系に対し、引き続き適度な水分供給が行えれば、十分に地上部生育を支えられると考えられる。従って、このような根系分布の表層への偏りは灌漑施設のない場合には問題となるが、生育期間を通して根域の土壤水分を制御できればよい。

4. 降水量が地下灌漑効果に及ぼす影響 (実験3)

地下灌漑処理と組合せた地表灌水量は、平年並み降水量の25% (実験1)、50% (実験2, 実験3) および100% (実験3) 相当である。栽培開始時に適湿条件として全期間地下灌漑を行うと、平年並み降水量の25%相当の少雨条件下で黒ボク土 364 mm・灰色低地土 267 mm, 50%で黒ボク土 267 mm・灰色低地土 175 mm, 100%で黒ボク土 83 mm・灰色低地土 54 mm が地下から給水された (第3図A, B, 第6図A)。栽培年が異なるため絶対量の単純な比較はできないが、地下灌漑量は両土壤とも地表灌水量が多いほど少ないといえる。平年並み降水量の25%および50%の少雨条件下で栽培すると、生育中期以降の土壤水分吸引圧は 80 kPa を超えてブロッコリーに水ストレスがかかり (第3図C, 第4図, 第6図B)、生育が阻害された (第1表, 第2表, 第3図D, 第5図)。少雨条件下で地下灌漑を行えば、水ストレスは回避でき、平年並み降水量相当の地表灌水を行った場合に匹敵する花蕾収量が得られた。しかし、平年並み降水量条件下で地下灌漑を行うと、両土壤とも花蕾重は小さく、黒ボク土では茎葉重も小さかった。これは、過剰な水分供給による湿害と考えられる。著者ら (中野ら, 2014) は、FOEAS が施工された水田転換畑 (グライ低地土) において地下水位を高く一定に設定すると、降雨時に地表まで湛水し、作土の酸素濃度が低下し、キャベツの生育を阻害することを報告した。本実験では雨よけ下で降雨を制御し、地下水位が表層まで上昇することはなかったが、平年並み降水量条件下での地下水位設定 -30 cm での灌漑はブロッコリーに対して過剰な水分供

給であることが示された。従ってブロッコリーへの地下灌漑では、地下水位を一定に維持することは避け、必要時に一時的に水位を設定して灌漑を実施すべきと考える。

以上のことから、夏播き秋どりブロッコリーにおいて、少雨条件下の地下灌漑によって平年並み降水量の場合と同程度の収量を得られることが示された。また、効果の大きい灌漑時期は、栄養成長期前半や花蕾肥大期後半に比べて、栄養成長期後半および花蕾肥大前半にあたる生育中期であると考えられた。さらに、収穫直前には灌漑をひかえ弱い水ストレスを与えて日持ち性を向上できる可能性が示唆された。今後、FOEAS 施工圃場において、本実験で明らかとなったブロッコリーへの地下灌漑効果を実証する予定である。

摘 要

水田転換畑における地下水位制御システム（FOEAS : Farm-Oriented Enhancing Aquatic System）の灌漑機能の活用を想定し、ブロッコリーの異なる生育時期および降水量下における地下灌漑の有効性を明らかにした。雨よけハウス下で2種類の土壌（黒ボク土と灰色低地土）を詰めた大型ポットを用いて試験した。地下灌漑処理は、付設タンクの水位を地表下-30 cm に設定して自動で給水した。夏播き秋どりブロッコリーの本圃生育期間の前期、中期、後期および全期間に少雨条件下（平年並み降水量の25%相当の地表灌水量）でそれぞれ地下灌漑処理を行った。地下灌漑なし・地表灌水量25%区と比較すると、地下灌漑処理によって土壌水分吸引圧が低く維持され、ブロッコリーの成長が旺盛となった。両土壌とも中期および全期間に地下灌漑を行った場合、平年並み降水量相当の地表灌水を行った場合と同程度の花蕾重が得られた。一方、地表灌水量によって地下灌漑の効果が異なり、平年並み降水量相当の地表灌水下では両土壌とも地下灌漑により花蕾重の減少、日持ち日数の短縮がみられた。従って、夏播き秋どりブロッコリー栽培において、生育時期や降雨条件に応じて地下灌漑を実施することによって干害を回避し、収量と品質を向上できると考えられた。

引用文献

- Allen, R. G., L. S. Pereira, D. Raes and M. Smith. 1998. Crop evapotranspiration. Guidelines for computing crop water requirements. p. 15-134. FAO Irrigation and Drainage Paper 56. Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome, Italy.
- 安養寺久男. 1990. うね間灌漑の最適設計方法. 農土誌. 58: 1009-1012.
- Babik, I. and K. Elkner. 2002. The effect of nitrogen fertilization and irrigation on yield and quality of broccoli. Acta Hort. 571: 33-43.
- Cogo, S. L. P., F. C. Chaves, M. A. Schirmer, R. C. Zambiasi, L. Nora, J. A. Silva and C. V. Rombaldi. 2011. Low soil water content during growth contributes to preservation of green colour and bioactive compounds of cold-stored broccoli (*Brassica oleracea* L.) floret. Postharvest Biol. Tec. 60: 158-163.
- Díaz-Pérez, J. C. 2009. Root zone temperature, plant growth and yield of broccoli (*Brassica oleracea* (Poenck) var. *italica*) as affected by plastic film mulches. Sci. Hort. 123: 156-163.
- Erdem, Y., L. Arinb, T. Erdem, S. Polat, M. Deveci, H. Okursoy and H. T. Gültaş. 2010. Crop water stress index for assessing irrigation scheduling of drip irrigated broccoli (*Brassica oleracea* L. var. *italica*). Agric. Water Manage. 98: 148-156.
- 藤目幸廣・廣瀬忠彦. 1981. ハナヤサイ類の花らいの肥大に及ぼす生育初期の温度の影響. 園学雑. 50: 215-224.
- 藤森新作. 2007. 転作作物の安定多収をめざす地下水位調節システム—水田リフォーム技術の開発—. 農業および園芸. 82: 570-576.
- 牛流清志・武田吉弘・中山利明. 1989. ブロッコリーの緑色保持に関する研究. 長野農総試報. 3: 27-37.
- Gutezeit, B. 2004. Yield and nitrogen balance of broccoli at different soil moisture levels. Irrig. Sci. 23: 21-27.
- 長谷川周一. 1986. 転換畑土壌中の水分移動. 土壌の物理性. 53: 13-19.
- Herrero-Martínez, J. M., E. Simó-Alfonso, V. I. Deltoro, A. Calatayud and G. Ramis-Ramos. 1998. Determination of L-ascorbic acid and total ascorbic acid in vascular and non-vascular plants by capillary zone electrophoresis. Anal. Biochem. 265: 275-281.
- 細野達夫・池田順一・大野智史・鈴木克拓・谷本 岳・片山勝之・関口哲生・関 正裕. 2015. 重粘土地下水位制御圃場へのネギ・ブロッコリーの適応性. 中央農研研報. 23: 1-22.
- 池田浩暢・石井利直・茨木俊行・小島孝之・太田英明. 2001. 輸送振動がブロッコリー (*Brassica oleracea* var. *italica*) の呼吸速度および内容成分に及ぼす影響. 日食保蔵誌. 27: 263-268.
- 石川昌男・石川 実・梶田貞義・幸田浩俊・秋山 実・中野政行・石居企救男・斉藤恵亮・三好 洋・渡辺春朗. 1973. 水田および水田転換畑の地下水位と湿害対策. 2. 転換畑の湿害対策とくに畦の高さ. 農業技術. 28: 342-345.
- 笠井良雄・西村謙三・塙 治雄. 1996. 転換畑における初夏どりブロッコリーの収穫期分散に関する研究. 茨城農総・農研報. 3: 47-53.
- 片山勝之・高橋智紀・大江和泉・持田秀之. 2013. 排水条件が劣悪な環境下における地下水位制御システムがダイズの生育収量に及ぼす影響. 日本作物学会講演要旨集. 236: 230-231.

- 加藤一郎・内藤文男・谷口利策・鴨田福也. 1965. 各種作物の蒸散量と葉面積指数. 東近農試研究速報. 2: 14-17.
- 三好 洋. 1973. 水田および水田転換畑の地下水位と湿害対策. 1. 水田および転換畑の地下水位の変動. 農業技術. 28: 293-296.
- 中野有加・東野裕広・村岡賢一・中西一泰・柳井洋介・岡田邦彦. 2014. 地下水位制御システム (FOEAS) 設工は場における設定水位が秋まきキャベツの生育に及ぼす影響. 園学研. 13: 125-133.
- 農林水産省. 2014. 野菜生産出荷統計. <<http://www.maff.go.jp/j/tokei/>>.
- 尾碕 亨・樋元淳一. 2010. ブロッコリー及びゆり根輸送の環境対応型包装資材への転換に関する研究. 酪農学園大紀要. 人文・社会科学編. 35: 65-90.
- Raes, D. and P. Deproost. 2003. Model to assess water movement from a shallow water table to the root zone. Agric. Water Manage. 62: 79-91.
- 里村多香美・中根周歩・堀越孝雄. 2001. ミニライゾトロンによる樹木細根の純生産の解明. 根の研究. 10: 3-12.
- 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 Prod. Sci. 15: 132-143.
- 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. 日作紀. 82: 233-241.
- Thorup-Kristensen, K. 1993. Root development of catch crops and of succeeding crop of broccoli. Acta Agric. Scand. Sect. B, Soil and Plant Sci. 43: 58-64.
- Toivonen, P. M. A. 1997. The effects of storage temperature, storage duration, hydro-cooling, and micro-perforated wrap on shelf life of broccoli. Postharvest Biol. Technol. 10: 59-65.
- 塚澤和憲・太田友代・関口明男. 2009. 関東中部平坦地のブロッコリー産地における降雨による被害要因の解析と対策. 農業および園芸. 84: 80-90.
- Wurr, D. C. E., A. J. Hambidge, J. R. Fellows, J. R. Lynn and D. A. C. Pink. 2002. The influence of water stress during crop growth on the postharvest quality of broccoli. Postharvest Biol. Technol. 25: 193-198.
- 山崎晴民・六本木和夫. 2001. 還元型ビタミンCの簡易測定法によるブロッコリーの品質診断. 埼玉農林総研セ研報. 1: 63-66.
- 銭本 徹・齊藤昌彦・鳥居俊夫・中司祐典・穂吉和枝・西田美沙子・小山寛史. 2009. 山口県における新たな地下かんがいシステム (FOEAS) の水田農業への適用. 近畿中国四国農研. 15: 17-22.