地下水位制御システム (FOEAS) の排水と灌漑による 夏播き冬どりブロッコリーの安定生産

中野有加*・栗山 淳・高橋 徳・柳井洋介・佐々木英和・岡田邦彦

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

Drainage and Irrigation Controlled by Farm-oriented Enhancing Aquatic System for Stable Production of Summer-sown Winter-harvest Broccoli (*Brassica oleracea* var. *italica*)

Yuka Nakano*, Jun Kuriyama, Megumu Takahashi, Yosuke Yanai,
Hidekazu Sasaki and Kunihiko Okada

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

Abstract

We examined the effect of drainage and irrigation by the Farm-Oriented Enhancing Aquatic System (FOEAS) on yield of summer-sown winter-harvest broccoli over three cultivations. Irrigation treatments were non-irrigation, once at transplanting, and twice at transplanting and the middle stage. Regarding the effect of drainage, constructing FOEAS reduced the drop in the oxygen concentration of soil during rainfall. As for cv. Grand-dome, the percentage of hollow stems was lower in the plot with FOEAS than that in the plot without FOEAS in the dry year. On the other hand, cv. Bellstar plants had a larger weight and width of the head in the plot without FOEAS than those in the plot with FOEAS in the dry year. Concerning the effects of irrigation, cv. Grand-dome in the twice-irrigated plot showed a lower percentage of hollow-stems than that in the plot without irrigation in the dry year. Comparing cv. Bellstar heads in the twice-irrigated plots with those in the plot without irrigation, the width was 7% larger in the dry year, and the weight was 10% larger in the early-rainy and middle-dry year. These results suggest that irrigation and drainage controlled by FOEAS promote stable production of broccoli.

Key Words : appearance quality, excess moisture injury, precipitation, soil water, upland field converted from paddy field

キーワード : 土壌水分, 外観品質, 降水量, 湿害, 水田転換畑

緒 言

我が国の水田作経営では、米の生産調整の見直しや米消費の低下などを背景として、稲作単一経営から複合経営への移行が進んでいる（農林水産省, 2015）。水田への導入品目の一つとして、ブロッコリーがある。ブロッコリー栽培は特別な機械を必要とせず、播種機や定植機などの導入により省力化が期待される（深瀬, 2013）。最近10年間（平成9～29年）では、作付面積は約3,000 ha増加して約14,900 ha, 出荷量は約20,300 t増加して約130,200 tに伸びている（農林水産省, 2007, 2017）。一方、平成29年の輸入量は、生鮮および冷凍の合計で62,098 tと総供給量の約3割を占める（財務省, 2017）。従って、国産ブロッコリーの安定供給のためには、作付面積の拡大とともに、単収向

上を図る必要がある。

ブロッコリーの生産リスクとして、天候不順による土壌水分の不足（El-Shikha ら, 2007）あるいは過剰（Lin ら, 2015; 塚澤ら, 2009）が挙げられる。水田で畑作物を栽培するために、排水対策として暗渠が施工されてきた。一方、水田の灌漑設備は畑作物には利用されにくかった。近年、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。FOEASは、排水機能に加えて灌水機能を持ち、水稻・畑作物の両方に利用できる（藤森・小野寺, 2012; 原口・若杉, 2014）。FOEASを活用した、ネギ・ブロッコリー（細野ら, 2015）、ニンジン（松尾ら, 2016）、ハクサイ（唐ら, 2012）など、露地野菜の生産性向上について報告されている。著者ら（中野ら, 2017）は先に、ポット試験において、夏播き秋どりブロッコリーの異なる生育時期、および降水を模した地表灌水下における地下灌漑の効果について報告した。少雨条件下で中期あるいは全期間に地下灌漑処理を行った場合、平年並み降水量相当の地表灌

2019年11月12日 受付。2020年3月5日 受理。
本報告の一部は園芸学会平成28年度春季大会で発表した。
* Corresponding author. E-mail: yuka88@affrc.go.jp

水を行った場合と同程度の花蕾重が得られた。但し、地表灌水量によって地下灌漑処理の効果が異なり、平年並み降水量相当の地表灌水下で地下灌漑を加えると、花蕾重の減少がみられた。そこで本研究では、降水量の多い時期の作型である夏播き冬どり作型について、水田転換畑におけるFOEASの排水および灌漑がブロッコリーの生育および収量に及ぼす影響について検証する。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正の相関を示すことが知られている(Díaz-Pérez, 2009)ため、両者の関係に着目して解析する。

材料および方法

1. 試験地および供試材料

茨城県稲敷郡河内町内(北緯35度52分55秒, 東経140度16分33秒)の生産者圃場に2013年6月にFOEASを施工した。施工前年は、水稻を作付けした。隣接する圃場の北側はダイズ転換畑, 南側は多品目の畑である。調査圃場の深さ2~15 cmの土壌は、粘土22.0%, シルト6.6%, 細砂41.6%, 粗砂29.8%で構成され、土性は埴壤土(CL)の細粒質灰色低地土である。地下水位制御の異なる4区画を設けるため、深さ60 cmに本暗渠を、深さ40 cmに1 m間隔で弾丸暗渠を配置した(第1図)。本暗渠は各区画に1本のみで支線はなく、弾丸暗渠は区の境界部分には施工していない。作ごとに圃場の周囲に額縁明渠を施工した。実験は夏播き冬どり作型で2013年, 2014年および2015年に栽培し、本稿では触れないが、冬播き初夏どり作型を2014年および2015年に実施した。すべての年次において、FOEAS無施工・無灌漑区(以下, nonF区), FOEAS無灌漑区(以下, F+nonW区), FOEAS 1回灌漑区(以下, F+W1区), FOEAS 2回灌漑区(以下, F+W2区)を設けた。F+nonW区では、排水口の水位制御器の内筒を常に抜いた状態とし、排水させた。F+W1区およびF+W2区では、灌漑時以外は-30 cm, 大雨時には内筒を抜き取り、排水を促した。灌漑はF+W1区では定植時のみ, F+W2区では定植時および生育中期に行った。生育中期は花芽分

化から出蕾までとし、この間に地表面から15 cm深(畝頂部から20 cm深)の土壌水分吸引圧を2日に1回確認し、20 kPa(約pF2.3)を上回った場合に灌漑を実施した。この灌漑開始点は、20~40 kPaで畝間灌漑を実施した場合にカリフラワーの収量が増加するという既報(Prabhakar・Srinivas, 1995)を参考にした。ポット試験(中野ら, 2017)において、灰色低地土で土壌が乾燥している場合、作土への水分供給のためには設定水位を高くして地下灌漑を行う必要があることがわかった。そこで灌漑時の水位制御器の設定は、-10~0 cmと高くし、給水停止の翌日に-30 cmに戻した。生育中期の終了として、2013年10月23日, 2014年11月7日, 2015年11月11日に水位制御器の内筒を抜き取り、以降は排水を促した。

‘グラウンドーム’((株)サカタのタネ)および‘ベルスター’(渡辺農事(株))を供試した。128穴セルトレイに育苗用培養土(げんきくん1号, 片倉コープアグリ(株))を詰めて2013年8月8日, 2014年8月5日, 2015年8月4日に播種し、ビニルハウス内で育苗した。育苗期間中の追肥は、OKF-1(OATアグリオ(株), N-P₂O₅-K₂O%:15-8-17)の1,000倍液を2回施用した。

8月上旬に、牛糞堆肥(N-P₂O₅-K₂O%:0.7-0.6-0.4)を1.4 t・10 a⁻¹施用した。元肥としてクミアイエコ化成8号(片倉コープアグリ(株), N-P₂O₅-K₂O%:8-8-8)と苦土重焼燐1号(小野田化学工業(株), P₂O₅%:35)により、7.1 g N・m⁻², 13.3 g P₂O₅・m⁻², 7.1 g K₂O・m⁻²相当量を施用した。また、NK化成2号(ジェイカムアグリ(株), N-K₂O%:16-16)により、14 g N・m⁻², 14 g K₂O・m⁻²相当量を10月上旬および下旬に分けて追肥した。畝は、高さ10 cm, 幅100 cm, 通路幅60 cmに成型した。ブロッコリー苗を2013年9月5日, 2014年8月28日, 2015年8月28日に条間60 cm, 株間40 cmで2条に定植し、栽植密度は3,195株・10 a⁻¹であった。

2. 土壌および気象環境の計測, 生育調査

土壌環境を計測するセンサは、各区の中央で本暗渠から1.5 m離れた畝内、かつ地表面から15 cm深に、各センサを3反復ずつ設置した。テンシオメータ(DIK-3046, 大起理化工業(株))により土壌水分吸引圧を求めた。ガルバニ電池式酸素センサ(KE-25, (株)ジーエス・ユアサコーポレーション)を埋設し、電圧ロガー(LR5041, 日置電機(株))により酸素濃度を測定した(Ityelら, 2014)。酸素濃度は、温度データロガー(TR-52S, (株)ティアンドデイ)により測定した地温で補正した。

基準蒸発散量(以下, ET₀)(mm・day⁻¹)は、気象データを用いてペンマン・モンテース法によって推定した。気象データのうち、気温、相対湿度、風速、日照時間は圃場で気象観測機器(クリマテック(株))により10分間隔で測定した値を用いた。気圧は、試験地から西に約6 km離れたアメダス地点龍ヶ崎(No.40426)の農業環境技術研究所モデル結合型作物気象データベースによる推定値を用いた。

第1図 FOEAS圃場の略図

図中の数値の単位はすべて m

ブロッコリーの花芽分化は検鏡によって調べ、2013年10月1日頃、2014年9月29日頃、2015年9月27日頃であった。出蕾は2013年10月30日頃、2014年10月24日頃、2015年10月30日頃であった。生育後期（2013年11月13日、2014年11月10日、2015年11月11日）に、各区内の2か所からそれぞれ6～7株を抜き取り、部位別新鮮重を調査した。収穫は、2013年11月21日～2014年1月22日、2014年11月12日～12月26日、2015年11月20日～12月18日に、週2～4回の頻度で行った。収穫は花蕾径12 cm以上、あるいは花粒が1～2 mmに揃った頃とした。頂花蕾を収穫し、長さ15 cmに調整後、花蕾重、花蕾径、切断面の茎径、外観品質を調査した。収穫調査は、2013年は各区内4区画それぞれ3.6 m²について、2014年および2015年は各区内3区画それぞれ6 m²について行った。

3. 統計解析

測定値は、圃場内の処理区内に設けた区画ごとに平均値を算出し、生育調査は2区画、収穫調査は3～4区画の平均値についてTukey-Kramer法により5%水準で統計処理を行った。2013年はF+W2区では灌漑開始点を超えなかったため、F+W1区と同じ処理とし、2処理区分をまとめて解析した。統計ソフトは、Microsoft Excel アドインソフト Statcel3（（有）オーエムエス出版）を用いた。

結 果

1. 気象条件と土壌環境

気象概況をみると、2013年は平年値に比べて9月、10月がやや高温で、全期間の日射量は9%多く、 ET_0 は17%大きかった（第1表）。一方、降水量は10月に台風のため平年の2.6倍と特に多く、全期間で1.4倍であった。2014年は日射量、 ET_0 が平年に比べてやや多く、降水量は9月が特に少なく、全期間では10%少なかった。2015年は、日射量、 ET_0 は全年次のうちで最も平年に近かった。降水量は9月が多く、10月は平年の32%とかなり少なかった。月単位の【降水量- ET_0 】は、2013年11月でわずかに負の値を示したものの、それ以外の月には正の値となった。

2013年は、15 cm深の土壌水分吸引圧がいずれの処理区でも栽培期間を通じて低く推移した（第2図B）。従って、2013年はF+W2区は生育中期の灌漑を実施せず、F+W1区として扱った。なお、FOEASの地下灌漑によって15 cm深の酸素濃度が低下することはなかった（第2図C）。nonF区の酸素濃度は、20 mm程度の一連の降雨時に低下した（第2図A, C）。特に台風による大雨のあった10月には5%以下まで大きく低下し、その後の回復も遅かった。一方、FOEASを施工した2処理区では、6日間で355 mmの降雨後、最も低下した時（10月22日）でも9%までの低下にとどまった。

2014年には、9月11日から10月4日まで23日間の無降

第1表 各栽培年次におけるブロッコリー生育期間の月別気象概況

	年次	9月	10月	11月	12月	積算 平年比
日平均気温 (°C)	2013	22.8	18.0	10.2	5.0	
	2014	20.8	16.6	11.6	4.5	
	2015	21.5	16.8	12.5	7.2	
	平年	22.2	16.4	10.5	5.4	
日平均日射量 (W・m ⁻²)	2013	175	114	117	104	1.09
	2014	166	127	99	104	1.06
	2015	142	153	93	95	1.04
	平年	143	120	104	99	
基準蒸発散量 (ET_0) (mm)	2013	75.7	46.4	27.2	21.6	1.17
	2014	67.0	44.1	23.3	21.8	1.07
	2015	54.8	57.4	20.2	20.2	1.04
	平年	63.6	40.3	23.5	18.9	
降水量 (mm)	2013	150.0	486.5	22.5	51.5	1.40
	2014	78.5	236.5	79.5	65.5	0.90
	2015	268.0	58.5	126.0	41.0	0.97
	平年	185.4	185.2	88.7	49.3	
降水量-基準蒸発散量 (mm)	2013	74.3	440.1	-4.7	29.9	1.06
	2014	11.5	192.4	56.2	43.7	0.60
	2015	213.2	1.1	105.8	20.8	0.67
	平年	121.8	144.9	65.2	30.4

第2図 ブロッコリー栽培期間中の降水量および地下灌漑量 (A), 土壌水分吸引圧 (B), 土壌中の酸素濃度 (C) の推移
 B: 15 cm 深, 各区3反復の3日間の平均値. 図中の+印は, 地下灌漑日を示す
 C: 15 cm 深, 各区3反復の3日間の平均値

雨期間があった。9月下旬にF+nonW区で他の区よりも土壌水分吸引圧が高まり、テンシオメータの測定限界に達した。F+W2区の中期の灌漑は、2014年10月1日に39mm実施した。灌漑後、F+W2区はF+W1区よりも土壌水分吸引圧が約10kPa低くなった。FOEASを施工した3処理区で排水口を開放した11月7日以降、11月下旬の無降雨時には、F+nonW区>F+W1区>F+W2区の順に土壌水分吸引圧が高かった。nonF区では、生育初期、中期、後期のいずれも20mm程度の降雨時に酸素濃度の低下がみられた。一方、FOEAS施工区では、降雨時にも10%を下回ることはなかった。また、定植時および生育中期の灌漑によって酸素濃度が低下することはない。

2015年は9月上旬に降雨が多く、その後も頻度が高かった。土壌水分吸引圧は、生育中期にF+W1区において25kPaと最も高くなった。10月14日と10月30日に、F+W2区中期の灌漑をそれぞれ20mmと7mm実施し、F+W1区よりも土壌水分吸引圧が低くなった。2015年についても、FOEAS施工区では酸素濃度が10%以下に低下することはない、灌漑による影響もみられなかった。

2. 茎葉の生育

‘ベルスター’の地上部重および茎重、‘グランドーム’の茎重について、2014年で他の年次よりも大きかった(第2表)。すべての年次、両品種とも、地上部重はnonF区で最も小さかった。FOEAS施工区では無施工区に比べて、2013年には両品種で地上部重が1.4~1.5倍と大きく、残存葉数は2013年の‘ベルスター’で約3枚、2015年の‘グランドーム’で3~5枚多かった。F+W1区およびF+W2区の地上部重は、F+nonW区と比べ、2013年の‘グランドーム’のみ大きく、他の年次および‘ベルスター’は同程度であった。F+W2区はF+W1区と比べ、2015年の‘ベルスター’のみ地上部・葉・茎重ともに大きく、他の年次および‘グランドーム’はいずれも同程度であった。2014年の‘グランドーム’ではF+W2区はF+W1区よりも残存葉数が約2枚少なかった。脇芽重は、両品種とも各年次において処理による差はみられなかった。

年次と処理の交互作用は、‘ベルスター’では葉重および残存葉数について、‘グランドーム’は地上部重、葉重、茎重、残存葉数で認められた。すなわち、FOEAS

第2表 FOEASの有無および地下灌漑がブロッコリーの後期の生育量に及ぼす影響^{yz}

品種	年度	処理区 (FOEAS・灌漑)	地上部 (gFW・plant ⁻¹)	葉 (gFW・plant ⁻¹)	茎 (gFW・plant ⁻¹)	脇芽 (gFW・plant ⁻¹)	残存生葉数 (枚)
ベルスター	2013	nonF	544.9 b ^x	373.8 b	157.2 b	13.9 a	18.0 b
		F+nonW	775.4 a	566.7 a	198.2 ab	10.5 a	21.4 a
		F+W1	869.3 a	608.1 a	237.9 a	23.3 a	21.1 a
	2014	nonF	1332.2 b	918.2 b	408.2 b	5.8 a	21.0 ab
		F+nonW	1393.9 ab	962.6 b	413.8 ab	17.5 a	22.2 a
		F+W1	1568.0 a	1040.7 ab	512.7 a	14.7 a	20.4 b
		F+W2	1603.2 a	1123.8 a	469.9 ab	9.5 a	21.3 ab
	2015	nonF	782.7 b	615.5 b	167.2 b	0.0 a	19.3 b
		F+nonW	899.5 ab	692.0 ab	207.5 ab	0.0 a	20.5 ab
		F+W1	818.9 b	629.6 b	189.3 b	0.0 a	21.0 a
		F+W2	1028.9 a	779.1 a	249.8 a	0.0 a	21.5 a
	年次	2013	764.7 b	539.1 a	207.8 b	17.8 a	20.4 a
		2014	1474.3 a	1011.3 a	451.1 a	11.9 a	21.2 a
		2015	881.9 ab	679.0 a	202.9 b	0.0 b	20.6 a
	処理	nonF	886.6 a	635.8 a	244.2 a	6.6 a	19.4 a
		F+nonW	1023.0 a	740.4 a	273.2 a	9.3 a	21.4 a
		F+W1	1031.4 a	721.6 a	294.5 a	15.3 a	20.9 a
		F+W2	1314.8 a	951.3 a	358.8 a	4.8 a	21.4 a
	交互作用	年度×処理	ns ^w	*	ns	ns	*
グラントーム	2013	nonF	638.4 c	474.1 b	135.7 b	28.5 a	27.2 b
		F+nonW	962.5 b	739.4 a	176.6 ab	46.5 a	28.2 ab
		F+W1	1169.0 a	862.6 a	211.0 a	95.3 a	30.1 a
	2014	nonF	1551.9 a	1208.3 a	343.7 a	0.0 a	28.1 a
		F+nonW	1735.0 a	1373.3 a	357.2 a	4.5 a	29.6 a
		F+W1	1692.7 a	1296.5 a	387.1 a	9.1 a	28.6 a
		F+W2	1740.6 a	1333.6 a	403.0 a	4.0 a	26.1 b
	2015	nonF	586.1 b	492.5 b	86.0 b	7.6 a	21.3 b
		F+nonW	1190.6 a	973.9 a	216.7 a	0.0 a	25.5 a
		F+W1	1159.1 a	957.8 a	201.3 a	0.0 a	25.8 a
		F+W2	1005.8 a	819.1 a	186.7 a	0.0 a	24.5 a
	年次	2013	984.7 a	734.7 a	183.6 b	66.4 a	28.9 a
		2014	1680.1 a	1302.9 a	372.7 a	4.4 b	28.1 a
		2015	985.3 a	810.7 a	172.7 b	1.4 b	24.3 a
	処理	nonF	925.5 a	725.0 a	188.5 a	11.4 ab	25.5 a
		F+nonW	1296.0 a	1028.9 a	250.2 a	17.0 ab	27.8 a
		F+W1	1297.4 a	994.9 a	252.6 a	50.0 a	28.7 a
		F+W2	1373.0 a	1076.2 a	294.9 a	2.0 b	25.3 a
	交互作用	年度×処理	**	*	***	ns	*

^z 2013年：2～4反復，2014年および2015年：2反復^y 2013年および2014年：7個体の平均値，2015年：6～7個体の平均値^x 同品種および同年次において，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^w 各品種において，年次および処理について交互作用の有無を検定した．***，**，*：0.1%，1%，5%水準で交互作用が有意であることを示す，ns：5%水準で交互作用が有意でないことを示す

施工および地下灌漑の追加による生育量の増大効果は年次により異なり，2014年よりも2013年と2015年で高かった。

3. 花蕾の形質

2013年には，両品種とも花蕾重に処理による差はみ

られなかったが，‘ベルスター’の花蕾径はF+W1区でF+nonW区，nonF区よりも大きかった（第3表）。2014年には，‘ベルスター’ではnonF区でF+nonW区よりも花蕾重が6%大きく，花蕾径はF+W2区＞nonF区＞F+W1

第3表 FOEASの有無および地下灌漑がブロッコリーの収量ならびに花蕾形質に及ぼす影響^z

品種	年次	処理区 (FOEAS・灌漑)	花蕾重 ^y (gFW・plant ⁻¹)	花蕾径 ^y (cm)	茎径 ^x (cm)	異常花蕾率(%) ^{xw}		正常花蕾率 (%) ^{xw}
						花茎空洞	リーフィー	
ベルスター	2013	nonF	387.4 a ^y	10.63 b				
		F+nonW	411.8 a	10.43 b				
		F+W1	447.1 a	11.46 a				
	2014	nonF	534.4 a	12.70 b	5.56 a	6.1 a	7.6 a	87.9 a
		F+nonW	502.0 b	12.12 d	5.50 a	14.3 a	1.4 a	82.9 a
		F+W1	519.2 ab	12.52 c	5.42 a	14.1 a	2.6 a	78.2 a
		F+W2	530.5 ab	12.91 a	5.51 a	14.7 a	2.7 a	78.7 a
	2015	nonF	396.6 c	9.94 b	5.17 b	1.3 a	0.0 a	98.7 a
		F+nonW	423.2 b	11.03 a	5.32 ab	0.0 a	0.0 a	98.7 a
		F+W1	447.8 a	11.07 a	5.29 ab	1.6 a	0.0 a	95.3 a
		F+W2	465.8 a	11.27 a	5.49 a	0.0 a	0.0 a	97.5 a
	年次	2013	434.4 a	11.20 a				
		2014	521.5 a	12.56 a	5.50 a	12.3 a	3.6 a	81.9 b
		2015	433.3 a	10.83 a	5.32 b	0.7 b	0.0 b	97.6 a
	処理	nonF	434.2 a	11.04 a	5.37 a	3.7 a	3.8 a	93.3 a
		F+nonW	442.3 a	11.12 a	5.41 a	7.1 a	0.7 a	90.8 a
		F+W1	462.7 a	11.61 a	5.36 a	7.8 a	1.3 a	86.8 a
		F+W2	498.2 a	12.09 a	5.50 a	7.3 a	1.3 a	88.1 a
	交互作用	年次×処理	ns ^u	ns	**	ns	ns	ns
グラウンドーム	2013	nonF	324.9 a	10.04 a				
		F+nonW	334.6 a	10.38 a				
		F+W1	362.7 a	10.99 a				
	2014	nonF	443.3 a	13.27 a	4.51 a	53.0 a	16.7 a	43.9 b
		F+nonW	431.0 a	14.75 a	4.46 a	58.5 a	11.7 a	37.6 b
		F+W1	427.3 a	13.15 a	4.43 a	40.5 a	12.6 a	54.4 b
		F+W2	423.3 a	13.24 a	4.40 a	13.1 b	6.0 a	80.8 a
	2015	nonF	427.9 a	12.29 b	4.48 a	23.5 a	1.4 a	73.7 b
		F+nonW	416.5 ab	12.98 a	4.33 ab	4.0 b	1.0 a	93.0 a
		F+W1	424.3 ab	12.66 a	4.34 ab	11.4 ab	0.0 a	85.7 ab
		F+W2	396.1 b	12.82 a	4.27 b	5.8 ab	0.0 a	90.6 ab
	年次	2013	342.8 a	10.65 a				
		2014	431.2 a	13.60 a	4.45 a	41.3 a	11.7 a	54.2 b
		2015	416.2 a	12.31 a	4.35 b	11.2 b	0.6 b	85.8 a
	処理	nonF	391.3 a	11.69 a	4.50 a	38.2 a	9.1 a	58.8 a
		F+nonW	388.1 a	12.27 a	4.39 ab	31.2 a	6.4 a	65.3 a
		F+W1	389.7 a	11.74 a	4.38 ab	26.0 a	6.3 a	70.1 a
		F+W2	409.7 a	12.77 a	4.33 b	9.5 a	3.0 a	85.7 a
	交互作用	年次×処理	ns	ns	ns	**	ns	**

^z 2013年：4～8反復，2014年および2015年：3反復^y 2013年：14～18個体の平均値，2014年：22～28個体の平均値，2015年：23～29個体の平均値^x 2013年：測定せず，2014年：22～28個体の平均値，2015年：23～29個体の平均値^w 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^v 同品種および同年次において，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^u 各品種において，年次および処理について交互作用の有無を検定した．***，**，*：0.1%，1%，5%水準で交互作用が有意であることを示す，ns：5%水準で交互作用が有意でないことを示す

第3図 生育後期の葉重および茎重と収穫時の花蕾重との関係

プロットは区ごとの平均値 (n=3~8) を示す

表計算ソフト MS-Excel (日本マイクロソフト (株)) のソルバー機能を用いて非線形最小二乗法により、葉重および茎重に対する収穫花蕾重の関係について近似曲線の式を求めた
 相関係数は、区ごとの測定値数を考慮して、重み付けを行って求めた

区 > F+nonW 区の順に大きかった。この差は、最も大きかった F+W2 区で、最も小さかった F+nonW 区よりも 7% 大きかった。一方、2014 年の「グランドーム」の花蕾重・花蕾径・茎径に処理による差はなかった。2015 年には、「ベルスター」で F+W1 区、F+W2 区 > F+nonW 区 > nonF 区の順に花蕾重が大きくなり、F+nonW 区との差は F+W1 区で 6%、F+W2 区で 10% であった。花蕾径も、F+W2 区で nonF 区よりも大きかった。2015 年の「グランドーム」は、nonF 区で F+W2 区よりも花蕾重と茎径が大きく、花蕾径は小さかった。花蕾の外観品質については、年次および処理によって「ベルスター」では差はみられなかった。「グランドーム」の花茎空洞発生率は、2014 年では F+nonW 区と nonF 区で 59%、53% と高く、2015 年では nonF 区で 24% と高かった。これに対して、2014 年は F+W2 区で 13%、2015 年は F+nonW 区で 4% と低かった。両年次とも、異常花蕾のうち処理区間の差がみられたのは花茎空洞のみであったため、これらはそのまま正常花蕾率の差に反映された。

全年次の全処理区について、後期の葉重および茎重と収穫時の花蕾重をプロットした (第3図)。区ごとの測定値数を考慮して重み付けを行った相関係数を求めると、「ベルスター」では、葉重と花蕾重の間に 0.71、茎重と花蕾重の間に 0.86 とそれぞれ高い相関関係が認められた。一方「グランドーム」では、茎重と花蕾重の間には 0.59、葉重と花蕾重の間には 0.49 とやや低いものの、それぞれ相関関係が認められた。

考 察

1. 気象条件

夏播き冬どりブロッコリーの栽培期間は、秋雨前線や台風の影響で短時間強雨が多い。本実験でも、すべての年次にまとまった降雨があった (第1表, 第2図A)。灌漑の

必要性の指標となる【降水量- ET_0 】は、2013 年 11 月を除いて正の値となり、干ばつのリスクは小さかった。しかし、土壌水分吸引圧の推移からみると、一時的に乾燥状態となる時期がみられた (第2図B)。本実験の各年次の気象条件の特徴は、降水量および土壌水分吸引圧の推移からみて、2013 年は多雨年、2014 年は乾燥年、2015 年は初期の多雨と中期の乾燥を特徴とする年といえる。

2. FOEAS による排水効果

20 mm 程度の降雨の際、FOEAS 無施工区では酸素濃度が低下した。一方、FOEAS 施工区においては、降雨時に酸素濃度が極端に低下することではなく、その後はすみやかに上昇していた。坂田ら (2017b) は、弾丸暗渠は、施工後 10 年を経ても、施工後 1 年未満の弾丸暗渠と同等の排水性を有することを示した。本実験では、FOEAS 施工後 3 年経過し、十分な排水機能を有していたといえる。

ブロッコリーの地上部重、葉重および残存生葉数は、多雨年である 2013 年について、両品種とも nonF 区で F+nonW 区よりも小さく、生育が阻害されていた。一方、地下水位を設定せず排水機能のみを利用した F+nonW 区は、定植時に灌漑を行い、通常の水位制御器の設定を -30 cm とした F+W1 区と比べ、地上部重に有意な差はみられなかった。中野ら (2014) は、FOEAS を施工した水田転換畑において地下水位を高く一定 (-30 cm) に設定したところ、降雨による土壌水分量の増加と地下水位の上昇に伴って作土の酸素濃度が低下し、キャベツの生育が阻害されることを示した。一般に、土壌の過湿によって葉の黄化や脱落が早まる (Drew・Lynch, 1980)。従って、本実験においても、FOEAS を施工していない場合、排水不良により土壌が過湿となって、酸素不足になった。その結果、根の機能を低下させ、地上部の生育が阻害される湿害が生じたと推察される。なお、全処理区とも 2013 年の地上部重は 2014 年に比べて小さく、FOEAS 施工区も湿害を受けていたと考え

られる。F+W1区の通常の水位制御器の設定は-30 cmとしたが、多雨年においては、排水を促すために、より低い水位設定とすべきと考えられる。

2014年も、nonF区で酸素濃度の低下頻度が多かった。しかし、nonF区とF+nonW区の葉重、茎重および残存生葉数には差はみられず、‘ベルスター’の花蕾重・花蕾径はnonF区でF+nonW区よりも大きかった。これは、定植時に灌漑せず、その後の降雨をFOEASにより排水した結果、乾燥ストレスがかかったものと考えられる。従って、2014年のように無降雨期間が続く場合には、気象条件に応じて適切に灌漑を実施した方がよい。

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知られている(Díaz-Pérez, 2009)。本実験においても、生育後期の葉重および茎重が大きいほど収穫花蕾重も大きくなった(第3図)。この関係の強さは、茎重と花蕾重について品種による差がみられ、‘ベルスター’で‘グランドーム’よりも両者の相関が高かった。これは、花蕾形質の違い、すなわち、‘ベルスター’は‘グランドーム’よりも花蕾径に対し茎径が太く、茎と花蕾の重量変化が対応していたことによると考えられる。2013年は両品種とも、地上部重、葉重はF+nonW区でnonF区よりも大きかったにもかかわらず、花蕾重については両区間に有意な差がみられなかった。台風により短時間強雨のあった10月中・下旬は、10月初旬の花芽分化から2~4週間後の花蕾形成期に当たる(藤目, 1983)。Wurrら(2002)は、花芽分化から約2週後が土壌水分変動に敏感であると報告している。従って、花蕾形成期に土壌の酸素濃度が低下したことが、F+nonW区において栄養成長量に見合う花蕾収量が得られなかった原因と推察される。

異常花蕾については、2014年に‘グランドーム’でnonF区・F+nonW区・F+W1区のいずれも花茎空洞が多発し、リーフィーは全処理区で同程度に多かった(第3表)。2015年に同じく‘グランドーム’では、nonF区でF+nonW区よりも花茎空洞が多く発生した。花茎空洞は商品の外観上の価値を損ない、重度の場合は出荷できない。さらに、近年では花茎も花芽部と同等に栄養価が高い(Singhら, 2011)ことが知られ、可食部として扱われるようになった。花茎空洞の発生は、窒素の過剰施用(Bakkerら, 2009)、灌水や疎植(Sanderson・Fillmore, 2010)などによって成長速度が大きい場合に多くみられる。‘グランドーム’は、相対的に葉重が花蕾重に対して大きく、本実験での年次および処理による葉重の変化幅も‘ベルスター’に比べて大きい。すなわち‘グランドーム’は、気象・土壌環境によって葉の成長量が変化し、シンクとしての葉と花茎の競合により、花茎空洞が発生しやすい品種と推察される。また、花茎空洞の発生は茎中デンプン濃度の低下と因果関係があると報告されている(Boersmaら, 2013)。2014年と2015年の共通点は、9月から10月上旬にかけて、酸素

濃度がnonF区でF+nonW区に比べて低く推移したことである。酸素濃度を測定した15 cm深は、作土と耕盤の境界付近である。細野ら(2015)は、FOEASで地下水位を設定した場合、ブロッコリーの根は表層10 cm以内に多く分布することを報告した。本実験では詳細な根系調査を行わなかったが、主な根域は15 cm深より浅いことを確認している。15 cm深の酸素濃度の値は根域の酸素濃度に比べてやや低い可能性があるものの、処理による差は同程度と考えられる。植物の根の呼吸および伸長が阻害される酸素の限界濃度は、5~10%の範囲であるとされる(Glińskiら, 2008)。2014年と2015年の酸素濃度は、nonF区では約5%まで下がったのに対し、F+nonW区では15%以上で推移した。10月上旬および下旬は、花蕾形成期(9月末~10月末)に当たる。この時期の根系の養水分吸収機能が抑制されたと考えられる。その結果、葉の光合成の抑制によって総乾物生産量が低下し、花茎への光合成産物の転流が不十分となり、花茎髓部の空洞が生じたものと考えられる。また、花茎空洞が多く発生した2014年は、9月中旬から10月上旬までは無降雨で乾燥が進み、10月5~6日の大雨(158 mm)により過湿となった。土壌水分の変動は、乾燥や過湿の単独のストレスにくらべ、根の発育と機能にとってより厳しいストレス要因として働くことが知られている(Nionesら, 2012)。従って、土壌の乾燥後の過湿という急激な変化が、根の機能を阻害し、花茎空洞を助長したものと推察される。

以上のことから、FOEASによる排水は、多雨時の地上部重の低下と異常花蕾の発生を抑える効果があったと考えられる。

3. FOEASによる灌漑効果

ブロッコリーの夏季の高温下で定植後の活着促進にFOEASの灌漑効果があると知られており(細野ら, 2015)、本実験でも定植直後に灌漑を実施した。前報(中野ら, 2017)で示した重点灌漑ステージと考えられる生育中期に、2014年は1度、2015年は2度それぞれ灌漑を実施したところ、土壌水分吸引圧が低下した。

年次によってブロッコリー生育に対する灌漑の影響は異なった。1回もしくは2回の灌漑によって無灌漑よりも後期の葉重あるいは地上部重が大きくなったのは、2014年‘ベルスター’、2013年‘グランドーム’であった。また、すべての年次の‘ベルスター’で、灌漑をした場合に花蕾重あるいは花蕾径が大きかった。特に2014年は、定植時のみの灌漑よりも中期に灌漑を加えた場合に、花蕾径がより大きかった。一方‘グランドーム’では、花蕾重および花蕾径に灌漑の影響はみられなかったが、2014年に2回灌漑区で花茎空洞が少なく、正常花蕾率が高かった。すなわち地下灌漑による収量への影響はいずれも、収量および外観品質へのプラスの効果であった。

ブロッコリー花蕾の形状や色などの外観品質は、生産者あるいは選果選別ラインにおいて主観的に判定されている

が、画像による客観的評価の試みもなされている (Makino ら, 2016). 高温, 低温, 土壌水分の過不足など環境条件によって異常花蕾が発生しやすいため, 正常花蕾率の向上は, 経営上大きな課題である. FOEAS による土壌環境の適正化は, 正常花蕾率を上げることが示された.

地下灌漑による酸素濃度の低下はみられなかったことから, 表層の土壌構造を攪乱することなく水分を供給できたと考えられる. 地表灌漑では, 圃場全体に給水するために給水栓側が湛水状態になる問題があるが, FOEAS の地下灌漑では湛水状態を生じせずに圃場全体に湿潤状態を作り出すことが可能である (坂田ら, 2017a). また, 水田転換畑では地表灌漑をすると土壌表層が軟弱になりやすいが, 地下灌漑では表層の硬度を保ちながら水稻根圏に水分を供給できる (金田ら, 2018). FOEAS 圃場は, 降雨後の地下排水によって地耐力が速やかに回復する (若杉・藤森, 2009). これは, 栽培期間中に薬剤散布など機械作業の頻度が高い野菜作にとって, メリットである.

4. ブロッコリー栽培における FOEAS の活用

夏播き冬どりブロッコリー栽培において, FOEAS の排水および灌漑の活用によって, 湿害と干ばつ害を軽減し, 大玉で良質な花蕾の収穫が可能であった. 高温下の定植後の活着促進, 栄養成長量の確保, 正常な花蕾形成のため, 多雨時の排水および乾燥時の灌漑が有効であった. 多雨時に圃場の乾燥を促す場合には, 余剰水の排除のため, 水位制御器の内筒を外すことで暗渠埋設深下端の地表面下 -60 cm に地下水位を下げる. 乾燥時の灌漑は, 土壌水分吸引圧を指標として灌漑開始を判断し, 地下水位設定を上げて給水して作土を湿潤状態にする方法が有用であった.

最近, 稲作の圃場水管理を遠隔または自動で制御するシステムが開発された (鈴木ら, 2019). 転換畑の園芸作目の生産においても, 効率的な水管理のために ICT の活用が期待される. 今後, 圃場の水分状態を連続測定する機器の導入や, 地下水位制御のみで作土の水管理を行うためのシミュレーション技術, 降雨予測をふまえた過剰な灌漑を避ける方法などの開発が求められる.

摘 要

地下水位制御システム (FOEAS: Farm-Oriented Enhancing Aquatic System) による排水および灌漑を実施し, 夏播き冬どりブロッコリーの収量に及ぼす影響を3作にわたり検討した. 灌漑処理は, 灌漑なし, 定植時のみ1回実施, あるいは定植時および生育中期に2回実施とした. 排水効果については, 降雨時に土壌の酸素濃度低下が軽減された. 乾燥年に‘グランドーム’では, 無施工区よりも FOEAS 施工区で花茎空洞発生率が少なかった. 一方, 乾燥年に‘ベルスター’の花蕾重・花蕾径が FOEAS 施工区で無施工区に比べて小さかった. 灌漑効果については, 乾燥年に, ‘グランドーム’の花茎空洞発生率は無灌漑区に対し2回灌漑区で低かった. ‘ベルスター’では, 2回灌漑区と無灌

漑区の花蕾を比べると, 乾燥年には直径が7%大きく, 初期に多雨で中期に乾燥した年には重量が10%大きかった. 従って, FOEAS の排水機能に加えて灌漑機能を生かすことによって, ブロッコリーの安定生産に資することが実証された.

謝 辞 本研究の遂行に当たり, 有限会社ながさお農産から栽培試験のご協力をいただきました. 農研機構フェローの藤森新作博士, 農研機構農村工学部門の原口暢朗博士にご指導をいただきました. ここに記して深く感謝いたします.

引用文献

- Bakker, C. J., C. J. Swanton and A. W. McKeown. 2009. Broccoli growth in response to increasing rates of pre-plant nitrogen. I. Yield and quality. *Can. J. Plant Sci.* 89: 527–537.
- Boersma, M., A. J. Gracie and P. H. Brown. 2013. Evidence of mechanical tissue strain in the development of hollow stem in broccoli. *Sci. Hortic.* 164: 353–358.
- Díaz-Pérez, J. C. 2009. Root zone temperature, plant growth and yield of broccoli [*Brassica oleracea* (Plenck) var. *italica*] as affected by plastic film mulches. *Sci. Hortic.* 123: 156–163.
- Drew, M. C. and J. M. Lynch. 1980. Soil anaerobiosis, micro-organisms, and root function. *Ann. Rev. Phytopathol.* 18: 37–66.
- El-Shikha, D. M., P. Waller, D. Hunsaker, T. Clarke and E. Barnes. 2007. Ground-based remote sensing for assessing water and nitrogen status of broccoli. *Agric. Water Manage.* 92: 183–193.
- 藤目幸廣. 1983. ハナヤサイ類の花らい形成並びに発育の温度条件に関する研究. 香川大農紀要. 40: 1–102.
- 藤森新作・小野寺恒雄. 2012. 地下水位制御システム FOEAS—導入と活用のポイント—. p. 115. 農文協. 東京.
- 深瀬浩三. 2013. 輸入量変動下のブロッコリー産地における農協共販組織の対応—埼玉県深谷市を事例として—. 季刊地理学. 65: 121–138.
- Gliński, J., J. Lipiec and W. Stepniewski. 2008. Plant roots and soil physical factors. p. 571–578. In: W. Chesworth (ed.), *Encyclopedia of soil science*. Encyclopedia of Earth Sciences Series. Springer, Dordrecht, Netherlands.
- 原口暢朗・若杉晃介. 2014. 水田輪作の新しいフレームワークと土壌学・植物栄養学の展開方向—5. 田畑輪換を可能とする水田の基盤と排水管理—. 土肥誌. 85: 264–267.
- 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.

- Ityel, E., A. ben-Gal, M. Silberbush and N. Lazarovitch. 2014. Increased root zone oxygen by a capillary barrier is beneficial to bell pepper irrigated with brackish water in an arid region. *Agric. Water Manage.* 131: 108–114.
- 金田吉弘・谷野弘和・高階史章・佐藤 孝・保田謙太郎. 2018. 重粘土大区画水田における地下灌漑システム FOEAS が高温登熟条件下における水稻収量および外観品質に及ぼす影響. *土肥誌*. 89: 197–203.
- Lin, H.-H., K.-H. Lin, S.-C. Chen, Y.-H. Shen and H.-F. Lo. 2015. Proteomic analysis of broccoli (*Brassica oleracea*) under high temperature and waterlogging stresses. *Botanical Studies* 56: 18. DOI: 10.1186/s40529-015-0098-2.
- Makino, Y., A. Wakatsuki, G. Amino, S. Oshita, A. Sato and M. Tsukada. 2016. Objective evaluation of external quality of broccoli heads using a computer vision system. *Jpn. J. Food Eng.* 17: 107–113.
- 松尾健太郎・山本岳彦・山崎 篤. 2016. 地下水位制御が春播きおよび夏播きニンジンの生育に及ぼす影響. *農作業研究*. 51: 59–68.
- 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) 設工ほ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.
- 中野有加・岡田邦彦・佐々木英和. 2017. 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. *園学研*. 16: 7–18.
- Niones, J. M., R. R. Suralta, Y. Inukai and A. Yamauchi. 2012. Field evaluation on functional roles of root plastic responses on dry matter production and grain yield of rice under cycles of transient soil moisture stresses using chromosome segment substitution lines. *Plant Soil* 359: 107–120.
- 農林水産省. 2007. 作物統計調査. 作況調査 (野菜). 平成 19 年産野菜生産出荷統計. <<http://www.maff.go.jp/j/tokei/>>.
- 農林水産省. 2015. 2015 年農林業センサス. 第 6 巻 農林業経営体調査報告書—構造動態編—. <<http://www.maff.go.jp/j/tokei/census/afc2015/280624.html>>.
- 農林水産省. 2017. 作物統計調査. 作況調査 (野菜). 平成 29 年産野菜生産出荷統計. <<http://www.maff.go.jp/j/tokei/>>.
- Prabhakar, M. and K. Srinivas. 1995. Effects of soil matric potential and irrigation methods on plant water relations, yield and water use of cauliflower. *J. Maharashtra Agric. Univ.* 20: 229–233.
- 坂田 賢・大野智史・加藤 仁・鈴木克拓・横山 浩. 2017a. 地下水位制御システムを利用した地下灌漑時における湿潤域・地下水位の経時変化と水収支. *農業農村工学会論文集*. 85: I_129–I_135.
- 坂田 賢・谷本 岳・大野智史・鈴木克拓. 2017b. 重粘土転換畑における地下水位制御システム整備で施工された弾丸暗渠の排水性. *農業農村工学会論文集*. 85: II_1–II_6.
- Sanderson, K. R. and S. A. E. Fillmore. 2010. Response of broccoli (*Brassica oleracea* var. *italica*) yield and hollow stem to plant density, trickle irrigation and transplanting date. *Can. J. Plant Sci.* 90: 729–735.
- Singh, B., S. Chaturvedi, S. Walia, G. Kaushik and S. Thakur. 2011. Antioxidant potential of broccoli stalk: a preliminary investigation. *Mediterr. J. Nutr. Metab.* 4: 227–230.
- 唐 星児・坂口雅己・五十嵐俊成・柳原哲司. 2012. 上川中部の晩春まきはくさいの生育に対する地下灌漑処理の影響. *日本土壤肥料学会講演要旨集*. 58: 245.
- 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.
- 若杉晃介・藤森新作. 2009. 水田高度利用を可能とする地下水位制御システム FOEAS. *農業農村工学会誌*. 77(9): 7–10.
- 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.
- 鈴木 翔・坂田 賢・若杉晃介. 2019. 稲作の圃場水管理における遠隔・自動制御の取組. *農研機構特別報告*. 1: 47–53.
- 財務省. 2017. 農林水産物輸出入統計. 貿易統計. 統計品別表. 輸入. <<http://www.customs.go.jp/toukei/info/tsdl.htm>>.