

研究報文

ドリップ灌漑およびドリップ・ファーティゲーションを用いた スイートコーン栽培における増収効果および多本取り

竹下正哲*・中西一弘**・高橋丈博***・蓑原 隆***・前山利幸***・日比哲也****・

戸祭 克*****・益満ひろみ*****・後藤 元*****

* 拓殖大学国際学部, ** 中西ファーム, *** 拓殖大学大学院工学研究科,

**** 拓殖大学外国語学部, ***** 株式会社サンホープ

Effects of Drip Irrigation and Fertigation on Yield and Production of Multiple Ears of Sweet Corn in Japan

Masanori TAKESHITA*, Kazuhiro NAKANISHI**, Takehiro TAKAHASHI***, Takashi MINOHARA****,

Toshiyuki MAEYAMA*****, Tetsuya HIBI*****, Masaru TOMATSURI*****,

Hiromi MASUMITSU***** and Hajime GOTO*****

日本のスイートコーン総生産量は、FAO データのある世界 52 カ国中 11 位であるが、1 ha あたり収量は 20 位に落ちる。1 ha あたりの収量が低い理由の一つは、1 株から 1 本しか収穫しない栽培法にあると思われる。本研究では、スイートコーンの収量をあげるために、露地において点滴灌漑（以下ドリップ灌漑）を用いる栽培法を提案し、ドリップ灌漑によって 1 株多本取りが可能かを検証した。スイートコーン多本取りにもっとも影響を与える要因は窒素と考えられるため、窒素施肥量 300 g/10 a/ 日の N1 区、500 g/10 a/ 日の N2 区、700 g/10 a/ 日の N3 区およびドリップ灌漑なし（降雨のみ）で固形肥料を用いる C 区の 4 処理を準備し、反復 5 回として完全無作為化法による実験計画を組んだ。結果は C 区よりも N1, N2, N3 区で有意に収量が多くなり、ドリップ灌漑の効果が見られた。N1, N2, N3 区間には有意差が見られなかったが、窒素施肥量が多くなるほどに、平均収量も多くなった。また N3 区の可販果数は平均 3.27 本 / 株となり、多本取りに成功した。収量の差を生んだ要因は、水分量と窒素施肥量であると考えられた。今後は各種センサー、衛星画像、クラウド、AIなどを連動させた IT 農業の発展が期待されるが、その際点滴施肥灌漑（以下、ドリップ・ファーティゲーション）による灌水量、施肥量の精密な制御が重要になってくる。

キーワード：スイートコーン、多本取り、点滴灌漑、ドリップ灌漑、ドリップ・ファーティゲーション

1. 緒言

スイートコーン (*Zea mays* L.) は多様なトウモロコシ栽培品種の一つであり、糖度が高いことに特徴がある。飼料用・加工用トウモロコシは穀粒

が乾燥・完熟（デント・ステージ）したときに収穫されるのに対し、スイートコーンは未熟な段階（ミルク・ステージ）で収穫され、穀物としてではなく野菜として食される（Alcantara 2015）。北米では紀元前 200 年以前からトウモロコシが栽培されているが、それらは家畜の餌のためか、あるいは油をとるために栽培されていたとされる（Hirich et al., 2014）。一方スイートコーンははじめから人間の食用に改良された品種であり、いつから栽培され始めたかは不明であるが、1779 年に Papoon と呼ばれる品種が北米で記録されてい

2018 年 8 月 22 日受付

2019 年 5 月 31 日受理

Corresponding author

竹下正哲 Takeshita MASANORI

〒193-0985 東京都八王子市館町 815-1

815-1 Tatemachi Hachioji city, Tokyo, Japan

E-mail : m-takesh@ner.takushoku-u.ac.jp

る (Schultheis 1996)。

日本の国全体のスイートコーン生産量は、統計資料のある世界52カ国中11位と上位にランクしているが、1haあたりの収量となると20位に落ちてしまい (FAOSTAT 2018)、決して生産効率がよいとは言いがたい。生産効率が低い原因の1つは栽培手法にあると考えられ、日本では1つの株から1本の雌穂を収穫する栽培法が広く推奨されている (川城 2001) ことに起因しているものと考えられる。海外の農場を視察すると、1株に複数の雌穂をならせている光景をよく目にする。

本研究では、スイートコーンの単位面積あたり収量を上げるために、ドリップ灌漑を用いた栽培法を提案したい。ドリップ灌漑 (drip irrigation) とは、日本語では点滴灌漑と訳され、専用チューブの小さな穴から、点滴のように灌水するシステムを指す。それに液体肥料を混ぜて、同時に施肥を行うのがドリップ・ファーティゲイション (drip fertigation, 点滴施肥灌水) である。

ドリップ灌漑は1970年代からイスラエルを中心に普及していった技術であり、現在では、ヨーロッパの灌漑はほぼすべてがドリップ灌漑かスプリンクラーに置きかわっており、イギリス、フィンランド、オーストリア、スロベニア、リトアニアでは全灌漑地の100%、ドイツでは98%、イスラエルでは99.6%となっている (ICID 2016)。一方日本のそれは17%で、とくにドリップ灌漑に限ってみると、全灌漑地のわずか2%に過ぎない (ICID 2016)。しかもその2%のほとんどはグリーンハウスの中の施設栽培で使われており、露地へのドリップ灌漑の導入事例は、茶 (木下 2006, 堺田ら 2004, 中野ら 2006)、ミカン (森永ら 2004, 草場ら 2004) など果樹の一部を除いては、ほとんど存在していない。その理由としては、雨季と乾季がはっきり分かれている諸外国とは違い、日本には1年を通じて作物が生育できる程度の降雨があるため、わざわざ高価な投資をしてまで灌漑設備を整えようとする農家が少ないためと考えられる。確かに夏の渇水対策のみを目的としてドリップ灌漑を導入するのであれば、費用対効果で採算がとれない可能性が高い。しかし、ドリップ灌漑によってスイートコーンの収量が上がり、2本取り、3本取りが可能になるのであれば、日本の露地にあえて灌漑を導入する意義も生じて

くるものと考ええる。

日本の露地栽培にドリップ灌漑を導入した実験は、前述の茶やミカンの他に、ハクサイ、レタス (植田ら 2009)、ピーマン (福嶋ら 2011, 漆原ら 2013) などがあるが、それらの研究目的は、夏の渇水対策あるいは土壌からの窒素流亡軽減、労働力の軽減に置かれており、収量増加を目的とした報告は1つもない。またスイートコーンについては、ドリップ灌漑を用いた実験が1つも報告されておらず、ドリップ灌漑がスイートコーンにどのような影響を及ぼすのか、日本では未解明のままである。

そこで本研究では、スイートコーンの露地栽培において、ドリップ灌漑 (ドリップ・ファーティゲイション) を導入することにより、増収および多本取りが可能になるかどうかを検証することを目的とした。

2. 材料および方法

1) 要因の設定

スイートコーンの多本取りについては、学術論文としての報告は見つけることができていない。実践報告としては、『現代農業』2013年7月号および2017年7月号にて、多本取りを実践している農家が紹介されている (農文協 2013, 農文協 2017)。中でも、2013年7月号の秋田・猪股義補氏の農場では、1株3~4本取りを実践しており、その秘訣は、分けつを旺盛にするとともに、大量の窒素を与えることと紹介されている。まず定植前に生堆肥 (未熟有機物) を10aあたり30~40t投入し、その後本葉五葉期、雄花抽出期、雌花開花期、果実肥大期に1株あたり50~70gの硫酸を追肥するとしている (果実肥大期は1週間に2回のペースで追肥)。猪股氏自身が「常識外れの窒素」と述べているほど大量の施肥であるが、それが3、4本取りを実現するための、一番重要な要因のようであった。

スイートコーンは、リンやカリウムなどの影響も強く受けることが報告されているが (Hart et al., 2010, Xiong et al., 2017)、一番影響が大きいのは、窒素であると思われる。Alcantara (2015) によると、スイートコーン生産においては窒素がもっとも重要で、作物の生長だけでなく、栄養価や香りを高めるアミノ酸の生産にも強く関わってくるとされている。窒素施肥を増やすことで、葉

の糖分、乾燥重量、光合成量、二酸化炭素同化率が増加し (Jin et al., 2013), それにより可販果の数、直径、穂軸長が増加すると報告されている (Cruz et al., 2015). そこで本研究では、トウモロコシ多本取りにもっとも影響するであろう要因は窒素施肥量と定め、実験計画を組んだ。

2) 実験計画

2017年、東京都八王子市にある拓殖大学国際学部農園 (35°37' N, 139°16' E, 標高225 m) にてスイートコーンの栽培実験を行った。栽培品種は「おひさまコーン88」を用いた。

窒素施肥量を要因として、一元配置の完全無作為化法による実験計画を組んだ。窒素施肥量の違いによる処理区を4つ準備し、反復を5回とした。4つの処理区のうち3つは、ドリップ灌漑に液肥を混入するドリップ・ファーターゲイションを行い、1つは対象区として灌漑なし (降雨のみ) とし、固形肥料による施肥を行った。液肥はOATアグリオ養液土耕1号 (N:P₂O₅:K₂O=15:8:17) を用い、窒素300 g/10 a/日のN1区、500 g/10 a/日のN2区、700 g/10 a/日のN3区を設定した。栽培予定の90日間に換算すると、N1区の窒素量は27 kg/10 a、N2区は45 kg/10 a、N3区は63 kg/10 aということになる。対象区 (C区) は播種時に元肥として窒素が30 kg/10 aになるよう化成肥料 (N:P₂O₅:K₂O=8:8:8) を施肥し、その後雄穂抽出期に窒素量6 kg/10 aを、化成肥料 (N:P₂O₅:K₂O=14:14:14) を用いて追肥した。試験区の土壌は火山灰を主体とした黒ボク土であり、実験を行った2017年には堆肥を施肥しなかったが、前年2016年3月に牛糞を主体とした堆肥2 t/10 aを全体に施肥しており、その後2016年4月から11月までピーマンを栽培していた。

灌水については、まず水道水を100 L受水槽のため、その水をモーターポンプ (工進MP25) でくみ上げ、ディスクフィルター (サンホープAR311) を通し、肥料混入器 (サンホープ・ドサトロンDR-6GL) を用いて液体肥料を混入した後、再びディスクフィルターを通して試験地に灌水した。ドリップチューブは、硬質・定量ドリッパー (サンホープPL-ND1615W) を用い、電磁弁 (サンホープDO-DEV25) とタイマーによって灌水量や灌水時間帯を制御した。N1、N2、N3区のドリップ灌水量 (液肥込み) は5 mm/日とし、1日

4回 (8, 10, 12, 16時) に分けて灌水した。C区は降雨のみとし、灌水を行わなかった。

栽培管理については、2017年4月28日に畝幅50 cm、株間50 cmで播種を行い、畝間の通路幅を90 cmとし、N1、N2、N3区については、畝の中央にドリップチューブを設置し、その上から黒ポリエチレンマルチを敷いた。C区は、ドリップチューブを設置せずに、黒ポリエチレンマルチを敷いた。1畝の長さは16 mで、5本の畝を立て、それらを4 mごとに1つの試験区として区切り、合計20区用意した。N1、N2、N3、C区の配置は、乱数表を用いてランダムに行った。農薬については、同じ農園で養蜂を行っている関係上、完全無農薬とした。分けつは放置し、枯死した個体については、試験区ごとの枯死率を計算した上で、収量などのデータからは除外した。収穫は7月21日に行い、すべての雌穂の重量を測定した後、各試験区8本 (×繰り返し5回) を105℃で48時間乾燥させ、乾物重量を算出した。

土壌水分および土壌温度については、誘電率土壌水分センサー (Parrot Flower Power) を各試験区に2つずつ、地表下10 cmに設置し、計測した。Parrot Flower Powerは汎用の植物管理センサーであるが、予備実験を行ったところ、誘電率土壌水分センサー専用機器と比べて遜色ないデータが得られており、センサーの信頼性として問題ないと判断した。降雨量は気象台のデータ (東京都八王子) を用い、蒸発散量については、農研機構農業環境変動研究センターが提供する「モデル結合型作物気象データベース MeteoCrop DB」のデータ (八王子ステーション) を参照し (農業環境変動研究センター2018)、FAO基準蒸発散量に作物係数をかけて、試験地の蒸発散量を推定した (FAO1998)。作物係数は、農林水産省構造改善局 (1997) のトウモロコシの値を用いた。土壌化学性については、実験前 (4月27日)、実験中 (6月19日)、実験後 (7月22日) の3回、土壌分析を行った。データの統計解析には、IBM SPSS Statistics ver.21を用いた。

3. 結果

1) 蒸発散量と土壌水分

4月28日の播種後、出芽は5月3~5日、4葉期が5月15~17日、8葉期が5月30日頃とすべての試験区でほぼ同速度で成長し、雄穂抽出期は

表1 ドリップ・ファーティゲーションが可販果, 乾物重量, 草丈, 枯死率に与える影響

treatment	Marketable Ear yield		Dry matter kg/10a	Plant height cm	Plant death rate %
	total	bigger than M size			
	kg/10a	kg/10a			
C	612 a	405 a	106 a	155	15.7 a
N1	1288 b	902 b	255 b	168	2.5 b
N2	1517 b	1128 b	318 bc	169	2.2 b
N3	1625 b	1212 b	338 c	168	2.5 b
Analysis of variance F-test probability					
treatment	0.00	0.00	0.00	0.13	0.04

* Different letters indicate significant differences at $P < 0.05$ using Duncan's multiple range test. Marketable ears are divided into 4 sizes; S size is less than 300g, M size is between 300g and 400g, L size is between 400g and 450g, and 2L size is more than 450g. Disease and insect damage were excluded from the criterion for the marketable ear.

6月5~10日, 絹糸抽出期が6月26~28日であった。草丈は, 6月17日の時点では, N1区が80~90cm, N2, N3区が90~110cm, C区が60~65cmと大きな差があったが, その後N1区とC区が急速に成長し, 収穫時には草丈において有意差が見られなかった(表1)。葉色については, 6月5日時点でN1, N2, N3区は葉色5~6(イネの葉色スケール), C区は4~5と若干の差があったが, 6月17日以降はすべての試験区で葉色6となった。雑草はマルチの隙間から出てくるものが若干あったので, 2週間に1度の頻度でハサミで切る作業を行った。無農薬栽培であったが, 生育が阻害されるほどの病虫害は観察されず, 収穫時に若干のアワノメイガによる食害が確認された程度であった。なお, 本実験は収量比較が目的であったため, 可販果の判定に際して食害は考慮しなかった。

スイートコーン栽培期間を通じた累積蒸発散量を示したのが図1の実線である。灌漑の基本は, 耕地から消失した水分量(蒸発散量)を補うことにあるので, 蒸発散量よりも与える水量が少ない場合, 作物に水ストレスがかかることになる。本実験を実施した2017年は, 梅雨にまとまった雨

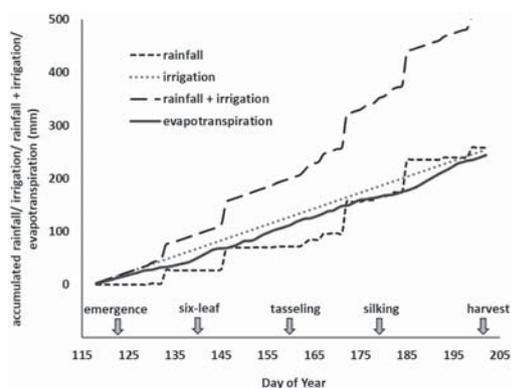


図1 トウモロコシ栽培期間の累積降雨量, 灌漑水量, 降雨量+灌漑水量および蒸発散量

がほとんど降らなかった年であり, 累積降雨量がDOY172日(6月21日)までずっと累積蒸発散量を下回っていたことがわかる(図1)。つまり, 灌漑をしていないC区は, 発芽から雄穂抽出期までずっと水不足の状態にあり, 雌穂開花期直前によやくまとまった雨が降り, それから収穫までは, 蒸発散量と同量か少し多い降雨があったと考えられる。それに対しドリップ灌漑を行った

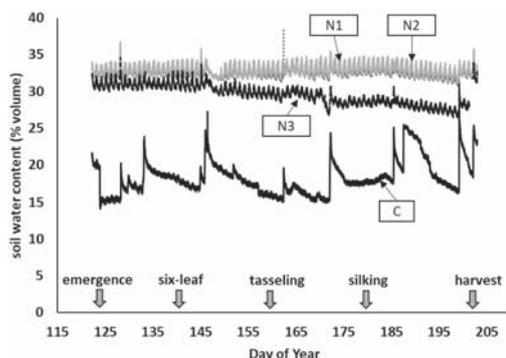


図2 各試験区の土壌水分変化

N1, N2, N3区は、降雨+灌漑の水量が与えられていたので、発芽から全生育期間を通して水ストレスを受けることはなく、収穫時までは、蒸発散量の約2倍の水分が与えられていたことになる(図1)。

それぞれの試験区の土壌水分変化を見てみると、やはりC区だけが水ストレスを強く受けていたことがわかる(図2)。土壌センサーは耕地のマイクロ環境の多様性により、センサー間で多少のばらつきが生じるのであるが、N1区とN2区の土壌水分はほぼ同じ波形を示し、全栽培期間を通して体積含水率が30~35%の範囲にほぼ収まっていた。N3区はN1,N2区と比べてDOY150日ぐらいから体積含水率が低くなる傾向が見られたが、それでも25%を下回ることはなかった。一方C区は、降雨がある度に体積含水率が急上昇するが、その後徐々に低下していくという傾向を繰り返し、おおよそ15~25%の範囲で変動していた。他の試験区に比べ、C区は水ストレスを受けていたことがわかる。

土壌温度については、全試験区の波形がほぼ完全に重なっており、試験区間の差は見られなかった。発芽直後はまだ最低地温が10℃を下回る日が何度かあり、梅雨から初夏にかけては最高地温が50℃を上回る日も観測されていた。

2) 収量比較

収穫された可販果の総新鮮重量(雌穂重量)はC区よりN1,N2,N3区が有意に大きくなった(表1)。ドリップ灌漑を行ったN1, N2, N3区間では有意差はなかったものの、窒素施肥量が多くなるほどに平均新鮮重量は増大しており、N3区は

灌漑を行っていないC区のおよそ2.5倍の収量となっていた。

可販果の中でも、規格内雌穂重量(Mサイズ以上)を比較してみると、C区とその他区間に有意差が見られ、もっとも多かったN3区はC区のおよそ3倍となっていた。乾物重量については、C区は他区よりも有意に小さく、N1とN3の間にも有意差が見られた。もっとも乾物重量が大きかったN3区は、もっとも小さかったC区のおよそ3倍となっていた。

草丈は、平均値ではCが他区よりも小さかったものの、Cの中でも170cmを超える大きなものもあり、処理区内のばらつきが大きかったために、有意差は見られなかった。N1, N2, N3の平均草丈はほぼ同じであり、窒素施肥量は草丈にはそれほど影響しないようであった。枯死率は、N1,N2,N3はおおよそ2%とほぼ同じ値であったが、C区のみ15.7%と有意に高くなっていた。

可販果の総本数については、C区は1株あたり平均1.45本となっていたが、N1区で2.7本、N2区とN3区はおおよそ3本となり、有意差が見られた(表2)。Lサイズ、2Lサイズの本数は、C区と他区の間で有意差が見られ、C区は0.21本しかなかったのに対し、もっとも多かったN3区は1.27本となっていた。規格内本数(Mサイズ以上)でも、C区はもっとも少なく、1株あたり0.7本、N3区はもっとも多く1.81本となっていた。

またドリップ灌漑区は分けつが旺盛となり、C区が1株あたり平均0.67本の分けつに対し、N2, N3区は1.5本と有意に多くなっていた。

3) 土壌化学性比較

土壌成分を比較してみると、実験前(4月27日)は硝酸態窒素が3.6 mg/100 g、アンモニア態窒素が0.0 mg/100 gと土壌診断としては標準的な値になっていた(表3)。黒ボク土であるため、有効態リン酸が少なく、7.0 mg/100 gとなっていた。交換性陽イオンのカリウムは59.9 mg/100 gと少なく、石灰は718.7 mg/100 gと過多であった。マグネシウムは標準値で、CECの値は大きく、腐食も多くなっていた。

実験中(6月19日)および実験後(7月22日)に行った土壌分析では、N1区はドリップ・ファージェイションの影響で硝酸態窒素が17.4 mg/100 g(実験中)と多くなっていたが、その後8.1

表2 ドリップ・ファーターゲイションが可販果本数および分けつ数に及ぼす影響

treatment	Number of marketable Ears			Number of tillers
	total	bigger than L size	bigger than M size	
	ears/stalk	ears/stalk	ears/stalk	
C	1.45 a	0.21 a	0.70 a	0.67 a
N1	2.72 ab	0.91 b	1.38 b	1.16 ab
N2	3.10 b	1.05 b	1.71 b	1.50 b
N3	3.27 b	1.27 b	1.81 b	1.52 b
Analysis of variance F-test probability				
treatment	0.02	0.00	0.00	0.01

* Different letters indicate significant differences at $P < 0.05$ using Duncan's multiple range test. Marketable ears are divided into 4 sizes; S size is less than 300g, M size is between 300g and 400g, L size is between 400g and 450g, and 2L size is more than 450g. Disease and insect damage were excluded from the criterion for the marketable ear.

表3 土壌分析結果

Parameters	27-Apr	19-Jun				22-Jul				
		C	N1	N2	N3	C	N1	N2	N3	
pH	6.9	5.9	6.3	6.1	6.2	6.0	6.7	6.7	6.7	
EC (mS cm ⁻¹)	0.10	0.81	0.34	0.56	0.61	0.69	0.16	0.18	0.19	
NO ₃ ⁻ (mg 100g ⁻¹)	3.6	44.1	17.4	30.4	31.9	21.6	8.1	9.0	10.2	
NO ₄ ⁺ (mg 100g ⁻¹)	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.9	1.4	0.9	1.2	
available P ₂ O ₅ (mg 100g ⁻¹)	7.0	0.9	1.1	1.4	1.1	25.6	7.4	1.9	1.4	
exchangeable cation	K (mg 100g ⁻¹)	60	116	128	214	181	107	72	76	99
	Lime (mg 100g ⁻¹)	719	680	641	628	661	697	670	688	655
	Mg (mg 100g ⁻¹)	104	119	88	73	82	126	96	95	87
CEC (meq 100g ⁻¹)	43.6	49.0	46.7	48.6	45.4	42.2	42.9	45.2	43.2	
organic matter (%)	7.4	9.6	8.6	9.3	9.2	8.4	7.6	8.0	8.4	
base saturation	K saturation (%)	2.9	5.0	5.8	9.4	8.5	5.4	3.6	3.6	4.9
	Lime saturation (%)	58.8	49.6	49.0	46.2	52.0	59.0	55.8	54.4	54.1
	Mg saturation (%)	11.9	12.2	9.4	7.5	9.0	14.9	11.1	10.5	10.0
	Total (%)	73.6	66.8	64.3	63.1	69.5	79.3	70.5	68.5	69.0

mg/100 g (実験後)と減少していた。それでも、土壌診断としては、硝酸態窒素過多の状態であった。N1区のアムモニア態窒素は、実験中には実験前同様0.0 mg/100 gであったが、実験後には1.4 mg/100 gと微増していた。有効態リン酸は栽培期間を通して低い値のままで、石灰、CECも栽培期間を通じて高い値であった。陽イオン交換性カリウムは実験中には127.7 mg/100 gと増加したが、実験後には71.7 mg/100 gと減少していた。

N2区も似たような傾向を示しており、実験中には硝酸態窒素が30.4 mg/100 gと大変高い値になり、実験後には9.0 mg/100 gと減少はするものの、標準よりは多い状態であった。アムモニア態窒素もN1区同様、実験中には0.0 mg/100 gであったが、実験後には0.9 mg/100 gと微増していた。有効態リン酸は栽培期間を通して低いままで、石灰、CEC、腐食は多かった。

N3区も、窒素については同様の傾向を示しており、実験中には硝酸態窒素が31.9 mg/100 gと極めて高い値となり、実験後には10.2 mg/100 gと減少していた。有効態リン酸が栽培期間を通じて少なく、石灰、CEC、腐食が多いという傾向も同じであった。ただN3区は、交換性マグネシウムが少なくなっていた。

ドリップ灌漑をしていないC区は、硝酸態窒素に関しては、実験中に44.1 mg/100 gともっとも大きな値になっており、実験後にも21.6 mg/100 gと過多のままであった。有効態リン酸は標準よりも少ないままであったが、実験後には25.6 mg/100 gと増加していた。

4. 考察

1) ドリップ灌漑と収量との関係

本実験より明らかになったことをまとめると、以下ようになる。まず収量は、降雨のみのC区よりも、ドリップ灌漑を行ったN1、N2、N3区の方が新鮮重量、乾物重量ともに多くなり、C区とN3区の差は新鮮重量、規格内重量、乾物重量でそれぞれ2.7倍、3.0倍、3.2倍となっていた。ドリップ灌漑を行ったN1、N2、N3区の間では、統計的有意差は見られなかったが、窒素施肥量が増えるほどに新鮮重量、規格内重量、乾物重量すべての平均値が大きくなっていった。乾物重量については、N1区とN3区の間にも有意差が見られた。つまりN3区の収量増加は、単に灌漑によ



図3 トウモロコシ1株4本取りの写真(可販果は3本)

り水分過多の状態で肥大したのではなく、多量の窒素施肥によりアミノ酸などの合成が進み、水分以外の固形分が増加していったと推測される。

雌穂の本数については、C区の1株あたりの可販果が平均1.45本だったのに対し、N3区は3.27本となっていた。ドリップ灌漑を行ったN1、N2、N3区では4本取りもいくつか見られ(図3)、商品にならない不良果も含めると、最大1株7本の雌穂がついた株も観察された。それら多本取りの多くは分けつにつく形となっていた。以上のように、ドリップ灌漑(ドリップ・ファーティゲーション)によりスイートコーンの多本取りが可能となり、降雨のみの場合と比べ、収量も多くなることが明らかとなった。

2) 水分量と収量の関係

なぜ降雨のみのC区と、ドリップ灌漑を行ったN1、N2、N3区との間に約3倍もの収量の差が生じたのか、その要因としては、大きく2つ考えられる。1つは水分量であり、もう1つは窒素

量である。

水分量については、実験を行った年がたまたま雨の少ない空梅雨であったため、C区は播種から雌穂開花期前までの約50日間、水ストレスを受け続けた形となっており(図1)、土壌の体積含水率も25%を超えることがほとんどない状況であった(図2)。それに対し、N1、N2、N3区は全栽培期間を通じて灌漑水量が蒸発散量を下回ることではなく、土壌水分も常に25%以上を保持しており、水ストレスを受けることがなかった(図1、図2)。

スイートコーンは、発芽後25日間のうちに雌穂の大きさが決定され、もしこの期間に水ストレスを受けることがあれば、雌穂の発達が永久に阻害されることが分かっている(Abu Dhabi Farmers' Service Centre 2015)。また雄穂抽出期から絹糸抽出期までの間に水ストレスを受けた場合、雄花の開花と絹糸抽出の間の空白期間(ASI: Anthesis-silking interval)が増加し、それにより受粉が阻害され、収量が減少すると報告されている(Tafrishi et al. 2013, Abu Dhabi Farmers' Service Centre 2015)。水分がスイートコーン栽培においてももっとも重要な要因であると多くの研究が報告しており(Tafrishi et al., 2013, Farsiani et al., 2011)、FAOの報告によると、スイートコーンには全栽培期間を通じて500~800 mmの水が必要とされている(Brouwer and Heibloem 1986)。本実験の場合では、毎日5 mmの灌漑を行ったN1、N2、N3区がかるうじて500 mmに届くといったレベルであり、降雨のみのC区はおよそ250 mmと、FAOが推奨する水量の半分にしか到達しなかった(図1)。このような水分条件の違いが、C区とその他区(N1、N2、N3区)との収量の差に大きく影響したと考えられる。

2) 窒素と収量の関係

水分環境の違いに加えて、窒素量の違いも収量に大きく影響したと考えられる。本実験では、スイートコーンの多本取りを目指して、あえて大量の窒素施肥を行った。本実験地のある東京都の施肥基準によると、スイートコーンの標準施肥量は、窒素13 kg/10 aである(農林水産省 2018)のに対し、N1、N2、N3の施肥量はそれぞれ27、45、63 kg/10 a、対象区のC区でも36 kg/10 aと大きな値に設定していた。その結果、窒素施肥量の増

加に伴って収量は増加し、可販果の本数もN3区で平均3.27本/株となり、多本取りに成功した。しかしながら、規格内トウモロコシ(Mサイズ以上)の本数となると、N3区でも平均1.81本/株にとどまっており、冒頭に紹介した『現代農業』2013年7月号に登場した秋田県の猪股氏の農園(1株3~4本取り)ほどの収量には至っていない。その理由は、様々な要因が複雑に作用していると想像されるが、もっとも大きな要因としては、やはり窒素施肥量の違いではないかと考えられる。

猪股氏の施肥量を紙面より計算してみると、栽培期間を通じた全窒素量は285 kg/10 a(生堆肥の窒素分を除く)にもなる。N3区の45倍の値であり、たいへん多い。本実験地でも、そこまで大量に窒素施肥したならば、さらなる多本取りができる可能性はある。

窒素とスイートコーンの関係を整理してみると、スイートコーンは発芽直後から多量の窒素を必要とすることが知られている(Hanna and Story 1992)。その後も生育ステージによって窒素吸収量は変化し、Zotarelli (2008)によると、植栽後20日頃には1株で1週間あたり70~220 mg、40日頃に200~450 mg、70日頃には80~210 mgの窒素を吸収する。つまり、トウモロコシが必要とする窒素量はおよそ解明されており、その分量に見合うだけの窒素を人為的に与えることが、施肥設計の基本となる。

養分吸収量に基づく各国の推奨施肥量を比較してみると、イスラエルで窒素48 kg/10 a (Hagin and Lowengart 1996)、オーストラリア17 kg/10 a (Queensland government 2005)、南アフリカ共和国24 kg/10 a (Starke Ayres 2014)、ニュージーランド31 kg/10 a (Reid 2016)、アメリカ27 kg/10 a (NETAFIM USA 2016)などとなっている。日本では、東京都で窒素13 kg/10 a、千葉県27 kg/10 a、埼玉県20 kg/10 a、神奈川県20 kg/10 a、北海道12 kg/10 a、福岡県39 kg/10 a(農林水産省 2018)となっており、国や地域ではばらつきはるものの、およそ12~48 kgの間に収まっているようである。これらと比較すると、本実験のN3区(63 kg/10 a)はかなり多い窒素量であり、『現代農業』2013年7月号猪股氏の事例(285 kg/10 a)は突出して多いことがわかる。

実際、本実験地の土壌分析結果を見てみると、栽培開始前は硝酸態窒素量が標準的な値であった

が、栽培中、収穫後はすべての試験区において硝酸態窒素過多になっていた(表3)。中でもC区の硝酸態窒素量がもっとも多かったが、その理由は、土壌中の窒素は降雨や灌漑によって生まれる水流(mass flow)に伴って作物の根に入っていくので(Sterbel and Duynisveld 1989)、渇水により水分供給が少なかったC区では、スイートコーンが窒素を吸い上げることができず、その窒素が土壌に蓄積したためと考えられる。

以上の窒素に関する考察をまとめると、本実験のC区はN1区よりも窒素施肥量は少ないにもかかわらず、総新鮮重量は有意に少なかったことから、固形肥料と天水による従来の栽培法よりも、ドリップ・ファーターゲイションによる栽培の方が、少ない窒素量でより多くの収量をえられることがわかった。一方、N1区とN3区で総新鮮重量に有意差が見られなかったことから、ドリップ・ファーターゲイションにおける窒素施肥量と収量は単純な比例関係ではなく、窒素施肥量をいくら増加させても、収量はそれ以上増加しなくなる頭打ち現象があることが示唆された。しかしながら、4本取りを実現している猪股氏のように、N3区の4倍以上もの窒素施肥を行えば、安定して4本取りが可能になる可能性は残されており、それは今後の検証課題となっている。

ただ猪股氏の窒素施肥量は、国際水準と照らし合わせても明らかに過多であり、河川や地下水を窒素で汚染する危険性が非常に高い。理想としては、猪股氏なみの収量を実現させながらも、窒素汚染を防止するために、できるだけ窒素施肥量を減らすことが望まれる。そのためにも、ドリップ・ファーターゲイションは有効と考えられる。なぜなら、天候や土壌条件に合わせて灌水量や施肥量を精密にコントロールできることが、ドリップ・ファーターゲイションの最大の利点だからである。

今回の実験では、天候に関わらず、毎日一定量の灌水および施肥を行う実験計画としたが、その手法では、ファーターゲイションと降雨のタイミングが重なってしまった場合、窒素が系外に流出する危険性が高い。そのような事態を避けるため、イスラエルやヨーロッパでは、毎日の蒸発散量をコンピューターで逐次計算し、その数値に合わせて灌水量やファーターゲイション量を自動調整するシステムが広く普及している。そうすることで、

貴重な水資源を節約し、経費を削減しているだけでなく、過剰な灌水による窒素流出をも軽減している。

今後は、そのようなドリップ・ファーターゲイションの利点を最大限に活かす形で、各種センサー、衛星画像、クラウド、AIなどを連動させた栽培法を確立し、環境に配慮しながら、露地での増収を実現させていきたいと考えている。

おわりに

著者らがドリップ灌漑にこだわる理由は、今や世界中がセンサーや衛星画像、クラウド、ITを駆使したハイテク農業を取り入れていく中で、日本はその流れに乗り遅れ、農業後進国になりつつある、という危機感から生じている。なぜ日本にIT農業がなかなか普及しないのか、その最大の理由は、露地への灌漑普及率の低さにあるのではないかと我々は考えている。なぜなら世界のIT農業の多くは、灌漑をベースに進化してきたからである。世界の多くの地域には、雨がまったく降らない乾季があるため、古くから灌漑が発達してきた。そしてその灌漑技術がより効率化されていく過程で、ドリップ・ファーターゲイションが生まれ、各種センサー(土壌センサー、気象センサー、植物センサー)による全自動灌水システムが生まれ、さらに衛星画像を駆使する精密農業が開発されていった。

日本には、アクチュエーターにあたるドリップ灌漑がまったく普及していないため、たとえセンサーや衛星画像などの分野で世界最高峰の技術を有していても、そのデータを活かすことができないように見受けられる。今後日本でIT農業を発展させていくためには、ドリップ・ファーターゲイション設備を露地に導入していくことが重要と考えており、本論はそのための基礎研究に位置づけられる。

引用文献

- Abu Dhabi Farmers' Service Centre (2015) : Growing sweetcorn for profit and sustainability 2014-2015 Season Guidelines. Abu Dhabi Farmers' Service Centre – open-field vegetable production guide. pp.1-8.
- Alcantara C G (2015) : Response of Sweet Corn (*Zea mays* var. *rugosa*) to Drip Fertigation in

- Varying Levels of Nitrogen. *Mindanao Journal of Science and Technology* 13 : 32-50.
- Brouwer C, Heibloem M (1986) : Irrigation water management: irrigation water needs. training manual No.3, FAO, Rome.
- Cruzl C, Filho A, Meneses N (2015) : Influence of amount and parceling of nitrogen fertilizer on productivity and industrial revenue of sweet corn (*Zea mays* L.). *Australian Journal of Crop Science* 9 : 895-900.
- Economist (2018) : Worldwide Cost of Living 2018. The Economist Intelligence Unit.
- FAO (1998) : Crop evapotranspiration - Guidelines for computing crop water requirements - FAO Irrigation and drainage paper 56. Food and Agriculture Organization of the United Nations.
- FAOSTAT (2018) : <http://www.fao.org/faostat/en/>
- Farsiani A, Ghobadi M, Jalali-Honarmand S (2011) : The effect of water deficit and sowing date on yield components and seed sugar contents of sweet corn (*Zea mays* L.). *African Journal of Agricultural Research* 6 : 5769-5774.
- 福嶋 昭・吉川弘恭 (2011) : 日射制御型拍動自動灌水と減肥栽培が夏秋ピーマンの収量並びに品質に及ぼす影響, 農業および園芸 86(5) : 507-513.
- Hagin J and Lowengart A (1996) : Fertigation for minimizing environmental pollution by fertilizers. *Fertilizer Research* 43 : 5-7.
- Hanna H and Story R (1992) : Yield of Super Sweet Corn as Affected by N Application Timing, Plant Density, Tiller Removal, and Insecticides. *Proceedings of the Florida State Horticulture Society* 105 : 343-344.
- Hart J M, Sullivan D M, Myers J R, Peachey R E (2010) : Sweet Corn (Western Oregon), Nutrient Management Guide. Oregon State University, pp1-21.
- Hirich A, Ragab R, Choukr-Allah R, Rami A (2014) : The effect of deficit irrigation with treated wastewater on sweet corn: experimental and modelling study using SALTMED model. *Irrig Sci*. 32 : 205-219.
- ICID (2016) : Annual report 2015-16. International Commission on Irrigation and Drainage. pp.75-82.
- Jin T, Zhou J, Chen J, Zhu L (2013) : The genetic architecture of zinc and iron content in maize grains as revealed by QTL mapping and meta-analysis. *Breeding Science* 63 : 317-324.
- 川城英夫 (2001) : 新野菜づくりの実際, 果菜 I ナス科マメ類, 農山漁村文化協会 pp.169-176.
- 木下忠孝 (2006) : 茶の点滴施肥栽培技術, 農業および園芸 81(5) : 597-605.
- 草場新之助・森永邦久・島崎昌彦・星 典宏 (2004) : 周年マルチ点滴灌水同時施肥法で栽培されたウンシュウミカンにおける細根の割合と呼吸活性, 根の研究 13(3) : 111-15.
- 森永邦久・吉川弘恭・中尾誠司・関野幸二・村松昇・長谷川美典 (2004) : 露地栽培ウンシュウミカンにおける周年マルチ点滴かん水同時施肥法の効果, 園芸学研究 3 : 33-37.
- 中野明正・中村茂和・上原洋一 (2006) : 茶の養液土耕による生産・品質を維持した施肥量削減効果, 農業および園芸 81 : 457-62.
- NETAFIM USA (2016) : Corn production manual, using subsurface drip irrigation. NETAFIM. pp.22-26.
- 農文協 (2013) : 一株四本どり! トウモロコシに限界はない, 現代農業 2013 年 7 月号, 農山漁村文化協会 pp. 72-78.
- 農文協 (2017) : 土寄せで, トウモロコシの1株3果どり, 現代農業 2017年7月号, 農山漁村文化協会 pp. 11-15.
- 農業環境変動研究センター (2018) : モデル結合型作物気象データベースMeteoCrop DB, <http://metecrop.dc.affrc.go.jp/real/top.php>
- 農林水産省構造改善局 (1997) : 土地改良事業計画設計基準 計画「農業用水 (畑)」平成 9 年. p.186.
- 農林水産省 (2018) : 都道府県施肥基準等. http://www.maff.go.jp/seisan/kankyo/hozen_type/h_sehi_kizyun/
- OECD data (2018) : <https://data.oecd.org/>
- Queensland government (2005) : Key issues. Sweet corn information kit. Reprint - information current in 2005. The state of Queensland, Department of Primary Industries & Fisheries. pp.81-238.
- Reid J (2016) : Sweet Corn Toolkit Manual.

- The New Zealand Institute for Plant & Food Research Limited, pp.16-28.
- 堺田輝貴・森山弘信・中村晋一郎他 (2004) : 煎茶園での点滴かん水施肥栽培が収量、品質および土壌浸透水に及ぼす影響, 福岡県農業総合試験場研究報告 23 ; 93-98.
- Schultheis J R (1996) : Sweet corn production. North Carolina State, USA, Department of Horticultural Science, North Carolina Cooperative Extension Service.
- Starke Ayres (2014) : SWEETCORN PRODUCTION GUIDELINE. www.starkeayres.co.za/com_variety_docs/Sweetcorn-Production-Guideline-2014.pdf
- Sterbel O and Duynisveld W H M (1989) : Nitrogen supply to cereals and sugar beet by mass flow and diffusion on a silty loam soil. *Z Pflanzenernahr Bodenk* 152 ; 135-141.
- Tafrihi S, Ayenehband A, Tavakoli H, Khorasani S, Joleini M (2013) : Impacts of Drought Stress and Planting Methods on Sweet Corn Yield and Water Use Efficiency. *Journal of Plant Physiology and Breeding* 3(2) ; 23-31.
- 植田稔宏・池羽智子・安東 赫・加藤一幾・河野隆・松本英一 (2009) : 葉菜類の露地栽培における点滴灌水施肥(養液土耕)栽培が収量・品質と施肥効率に及ぼす影響, *日本土壤肥料科学雑誌* 80(5) ; 477-486.
- 漆原昌二・大友英嗣・藤尾拓也・本田純悦 (2013) : 露地ピーマンの点滴かん水による効果とリン酸減肥, *東北農業研究* 66 ; 145-46.
- Xiong H, Xiong Y, Zhang G, Peng Z (2017) : Effects of Nitrogen, Phosphorus and Potassium on Yield of Sweet Corn. *Advances in Engineering Research* 125 ; 216-219.
- Zotarelli L, Scholberg J, Dukes M, Muñoz-Carpena R (2008) : Fertilizer Residence Time Affects Nitrogen Uptake Efficiency and Growth of Sweet Corn. *Journal of Environmental Quality* 37 ; 1271-1278.

Abstract

According to the FAO, Japan ranks 11th among 52 countries in the total production of sweet corn. However, in terms of yield per hectare, Japan ranks 20th in the world. This relatively low production efficiency is likely the result of the conventional Japanese cultivation system, in which the farmers grow only one ear of corn per stalk. In this study we investigate whether drip irrigation and fertigation techniques could yield multiple ears of corn per stalk in open-field culture of sweet corn in Japan. The study used a randomized complete block design and was replicated five times. There were four treatments of different fertigation regimes: 300 gN/10 a/day (N1), 500 gN/10 a/day (N2), 700 gN/10 a/day (N3), and conventional soil application of solid N fertilizer without any irrigation (control). The result showed that the yield from all fertigation treatments (N1, N2, and N3) were significantly greater than the control treatment. Although yield did not significantly differ among N1, N2, and N3, the average yield increased with increases in the amount of N applied. The average number of marketable fruits produced by N3 was 3.27/stalk, showing that the successful production of multiple ears per stalk can be achieved. Differences in yield among the treatments may have resulted from differences in the amount of N and water applied. IT agriculture is expected to continue developing in the near future using a variety of sensors, satellite imagery, cloud data, and AI technology. Drip fertigation will certainly be an important component of IT agriculture because of the capability of precisely controlling the amount and timing of irrigation water and fertilizers.

Key Words

drip fertigation, drip irrigation, maize, multiple ears, sweet corn

