

資 料

ドリップ灌漑およびドリップ・ファーターゲイションが 露地ピーマンの収量に及ぼす影響

竹下正哲*・中西一弘**・高橋丈博***・蓑原 隆***・前山利幸***・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, **** 株式会社サンホープ

Influence of Drip Irrigation and Drip Fertigation on the Yield of Bell Peppers in Open Fields

Masanori TAKESHITA*, Kazuhiro NAKANISHI**, Takehiro TAKAHASHI***, Takashi MINOHARA***,
Toshiyuki MAEYAMA***, Masaru TOMATSURI****, Hiromi MASUMITSU**** and Hajime Goto****

*Takushoku University, Faculty of International Studies

**Nakanishi Farm

***Takushoku University, Graduate School of Engineering

****Sun Hope co., Ltd.

ドリップ灌漑はヨーロッパ、イスラエルなどを中心に世界に普及しているが、日本では全灌漑地の2%でしか使用されていない。その理由は、日本は四季を通じて十分な降雨があるため、露地栽培でドリップ灌漑は必須ではないとみなされてきたためと考えられる。本研究では、降雨が十分にある日本の露地において、ドリップ灌漑を導入することで、ピーマンの単位面積あたり収量を増加させることができるのではないかという仮説を検証した。「ドリップ灌漑の有無」「固形肥料・液体肥料の違い」の2要因を設定し、そのどちらが影響しているか、あるいは交互作用があるかを検証するために、ピーマンを用い、二元配置の分散分析実験を行った。結果は、「固形肥料・液体肥料の違い」に関わらず、ドリップ灌漑をした試験区の方が、ドリップ灌漑をしなかった試験区（天水のみ区）より収量（生重量）、乾燥重量、着果数が増加した。とくに収穫量が落ちてくる9,10月の収量が、ドリップ灌漑区で多くなっていた。その差の要因は多頻度灌水にあると考えられ、日本の露地のように十分な降雨がある耕地においても、ドリップ灌漑により毎日定期的に灌水することで、ピーマンの着果数を増やし、収量を増加させることができることが示唆された。

キーワード：収量、点滴灌漑、ドリップ灌漑、ドリップ・ファーターゲイション、養液土耕

1. 緒言

ドリップ灌漑 (drip irrigation) は、1970 年代頃からイスラエルを中心に実用化されていっ

た技術であり、良質のエミッターが発売されると、広く世界に普及していった (Sivanappan and Padmakumari 2016)。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おきかわっており、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99.6%がドリップ灌漑かスプリンクラーになっている (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)。日本は、他

2017 年 4 月 6 日受付

2018 年 11 月 23 日受理

Corresponding author

竹下正哲 Masanori TAKESHITA

〒193-0985 東京都八王子市館町 815-1

Takushoku University, Faculty of International Studies,
815-1 Tatemachi Hachioji city, Tokyo, Japan

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

の先進諸国と比較して、ドリップ灌漑普及率がたいへん低いことがわかる。

その主な理由は、日本には四季を通じて十分な降雨があるためと考えられる。すなわち、日本においては、灌漑が必須となるのは施設栽培のみであり、露地栽培については、水田の冠水灌漑 (flood irrigation) を除いては、それほど差し迫った必要性がなかったという事情が挙げられる。それは世界においては極めてまれともいってよい状態で、世界の多くの地域は雨季と乾季がはっきりとわかれているため、乾季には灌漑が必須であり、またヨーロッパなどでは施設栽培が主流となっているため、やはり灌漑が必須となっている。それらの地域では、水利用率が低い冠水灌漑や畝間灌漑 (furrow irrigation) から、水利用率がもっとも高いドリップ灌漑へと移行していく動きが急速進んでいる (Phogat et al. 2012, Donk et al. 2013)。

十分な降雨のある日本においては、ドリップ灌漑の必要性は高くないが、本研究では、日本の露地にあえてドリップ灌漑を導入するメリットを提案したい。もちろん日本でも古くから灌漑設備は使われてきた。スプリンクラーや灌水チューブを使用している農家は多く、またドリップ灌漑についても、茶や果樹などでは実用化されつつあると報告されている (木下 2006, 森永ら 2004)。ただそれら灌漑の目的は、夏の高温乾燥対策、労働力の軽減、あるいは窒素流亡の軽減といったものが主たるものであると考えられる。それに対し本研究では、収量増加という視点からドリップ灌漑の有用性を検討する。すなわち本研究の仮説は、降雨だけで十分な水分を得ることができる日本の露地栽培において、あえてドリップ灌漑およびドリップ・ファーターゲイションを導入することで、単位面積あたりの収量をあげることができるのではないかというものである。

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・ファーターゲイション (drip fertigation, 点滴施肥灌水) である。

露地においてドリップ灌漑を導入することで収量が上がったという報告は、世界には多数ある。たとえばアメリカ (Simon et al. 2013)、トルコ (Dogan et al. 2008)、スペイン (Pascual-Seva et al.

2015)、インド (Patel and Rajput 2009)、中国 (Kong et al. 2012) などがあげられるが、それらの実証研究のほとんどすべては、雨季と乾季がはっきりと分かれた地域で行われており、日本のように十分な降雨がある中でドリップ灌漑の効果を検証した実験は、海外の報告には存在しない。

一方日本での事例については、すでにたくさんのドリップ灌漑およびドリップ・ファーターゲイションの報告があり、たとえばトマト (坂口ら 2013, 荒木ら 2005, 斎藤ら 1999, 菅沼 1999)、キュウリ (佐藤ら 2005, 六本木 1995)、ピーマン (安岡ら 2005, 竹内ら 1998, 長友ら 2001)、ナス (満田ら 2005, 山崎ら 2002, 井上ら 2003) などがあげられる。しかし、これらの報告はすべて施設内での研究であり、露地でのドリップ灌漑の参考にはならない。

露地への導入事例となると極端に少なくなるが、茶 (木下 2006, 堺田ら 2004, 中野ら 2006)、ミカン (森永ら 2004, 草場ら 2004) などの報告があり、野菜についても、ハクサイ、レタス (植田ら 2009)、ピーマン (福岡ら 2011, 漆原ら 2013) などがある。これらの研究は、本研究の先行事例と位置づけられるが、研究の主眼を土壌からの窒素流出をいかに減らせるか、あるいは労働力の軽減という点に置いているものが多く、本研究のような、ドリップ灌漑によっていかに積極的に収量をあげることができるか、という視点の研究は一つもない。

ただ研究目的に増収を掲げておらずとも、結果的にドリップ・ファーターゲイションあるいはドリップ灌漑で増収しているという報告はいくつかあり、茶 (木下 2006, 白井ら 2006, 白井ら 2010, 堺田ら 2004)、ハクサイ、レタス (植田ら 2009)、ピーマン (福岡ら 2011) などがそれに当たる。これらの研究は、ドリップ・ファーターゲイションによって慣行栽培よりも収量が増加したと報告しているが、すべて「ドリップ・ファーターゲイション区」と「慣行栽培区」を比較しただけであるため、その増収の要因が本当にドリップ灌漑によるものなのか、あるいは単純に慣行栽培の固形肥料が液体肥料に置きかわったことによる影響なのか、その判断をつけることができなくなっている。実際、海外における報告では、同じドリップ灌漑を行った場合でも、肥料が固形か液体かで収量に差が出てきている (Locascio et al. 1974,

Mohammad et al. 1999) ため、日本でも、その両者を明確に区別することが重要と考えられる。

また日本の既存研究はすべて試験区の反復が1~2と少ないため、たとえば「もともと慣行区の方が、水はけが悪かった」あるいは「日当たりが悪かった」というようなドリップ灌漑以外の要因(統計学という系統誤差)を結果から排除することができていない。

以上のように、日本の露地におけるドリップ灌漑の効果については、未解明な点が多い。そこで本研究では、日本の露地において、ドリップ灌漑およびドリップ・ファーターゲイションを導入することで、単位面積あたり収量をあげることができるとする仮説を、ピーマンを試験作物として検証することを目的とした。その際、試験区の反復数を多くすることで系統誤差を小さくするとともに、「ドリップ灌漑の有無」要因と「肥料の種類(固形肥料か液体肥料か)」要因を明確に分離し、増収に直接つながっている要因を特定できるよう実験計画を組んだ。

2. 材料および方法

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)にて栽培実験を行った。八王子で一般的に行われているピーマンの露地栽培は、固形肥料にて基肥・追肥を与え、灌漑設備は使用せず、天水にのみ頼った手法である。その栽培法とドリップ・ファーターゲイションとの間では、「ドリップ灌漑の有無」と「肥料の種類(固形肥料か液体肥料か)」の2つの要因が混在している。その2要因のどちらが収量に影響してくるか、あるいは交互作用が生じるかを検証するために、二元配置の分散分析を用いた実験計画を組んだ。処理区は4種類で、①ドリップ灌漑あり+液体肥料のDL区(Drip irrigation × Liquid fertilizer)、②ドリップ灌漑あり+固形肥料のDG区(Drip irrigation × Granular fertilizer)、③ドリップ灌漑なし+液体肥料のRL区(Rain-fed cultivation × Liquid fertilizer)、④ドリップ灌漑なし+固形肥料のRG区(Rain-fed cultivation × Granular fertilizer)を設定した。ドリップ・ファーターゲイションはDL区に相当し、八王子での一般的な栽培方法は、RG区である。

試験作物としてはピーマン(*Capsicum annuum* L. var. *grossum*)を選んだ。ピーマンは世界中で

栽培されている作物であり、温度変化に敏感で夜間気温が16°Cを下回ると、成長や収量が急激に下がるとされている(Lodhi et al. 2016)。また土壌水分も重要で、乾燥が続くと生産性が低くなると報告されている(Kaushal et al. 2011)。そのような性質から、ドリップ灌漑の効果を検証するのに最適な作物と考えられた。品種は「京まつり」を使用した。

ピーマン苗は2016年5月13日に畝幅50 cm、株間50 cm、畝間の通路幅100 cmで定植した。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。DL、DG、RL、RGの各試験区が反復数5になるよう、乱数表を用いてランダムに配置した。DL区には、ドリップチューブを畝の中央に敷き、液体肥料を混ぜた水を毎日4回(8, 10, 12, 16時)ドリップ灌水した(ドリップ・ファーターゲイション)。DG区には、ドリップチューブを畝の中央に敷き、水のみを毎日4回(8, 10, 12, 16時)ドリップ灌水し、施肥には固形肥料を用いた。RG区には、灌漑装置は設置せず、固形肥料にて施用した。RL区には、灌漑装置を設置せず、施肥については、液体肥料を2週間に1度まとめてじょうろで散布した。

実験地の土壌は、火山灰を主体とした黒ボク土であり、実験に先立ち2016年3月に牛糞を主体とした堆肥2 t/10 aを全体に施肥した。その後、試験地全体で土壌条件が均一になるよう、一度表層40 cmほどの土壌をすべて別の場所に移し、攪拌し、それから試験地に戻して、トラクタで耕すという作業をした。DG、RG区の固形肥料については、東京都の施肥基準量(東京都産業労働局農林水産部2017)を参考に、窒素が10 kg/10 aになるよう化成肥料(N:P₂O₅:K₂O=8:8:8)を5月13日に施用した。7月1日に1回目の追肥(窒素4 kg/10 a, 化成肥料(N:P₂O₅:K₂O=14:14:14))をし、その後は2週間おきに追肥を行った。DL区の液体肥料については、六本木ら(2000)のピーマンでの施肥例を参考に、栽培初期(5月13日~6月30日)には、OATアグリオ養液土耕5号(N:P₂O₅:K₂O=12:20:20)を用い、窒素が120 g/日/10 aとなるよう設定した。栽培中後期(7月1日以降)はOATアグリオ養液土耕1号(N:P₂O₅:K₂O=15:8:17)を用い、窒素が200 g/日/10 aになるよう設定した。散水は毎日4回行い、

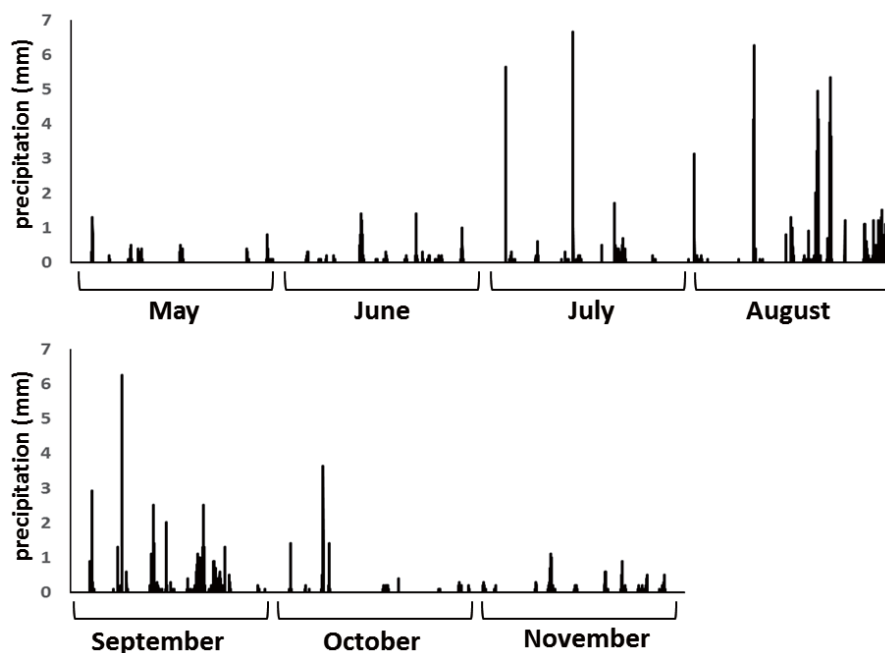


図1 2016年実験地の降水量

散水深 3 mm/ 日を確保するように設定した。DG 区については、施肥は前述した固形肥料で行い、水のみドリップ灌漑を行った。散水は DL 区と同じように毎日 4 回行い、散水深 3 mm/ 日を確保するように設定した。RL 区については、ドリップ灌漑を行わず、DL 区 14 日分の液体肥料をまとめ、適度な濃度に薄めてから 2 週間に 1 度じょうろで散布した。

ドリップ灌漑装置については、まず水道水を 100 L 受水槽にため、その水をモーターポンプ（工進 MP25）でくみ上げ、DG 区には、そのままディスクフィルター（サンホープ AR311）を通して散水した。DL 区については、ポンプで水をくみ上げた後、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、ディスクフィルターを通して試験地に散水した。ドリップチューブは、硬質・定量ドリッパー（サンホープ PL-ND1220W）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。

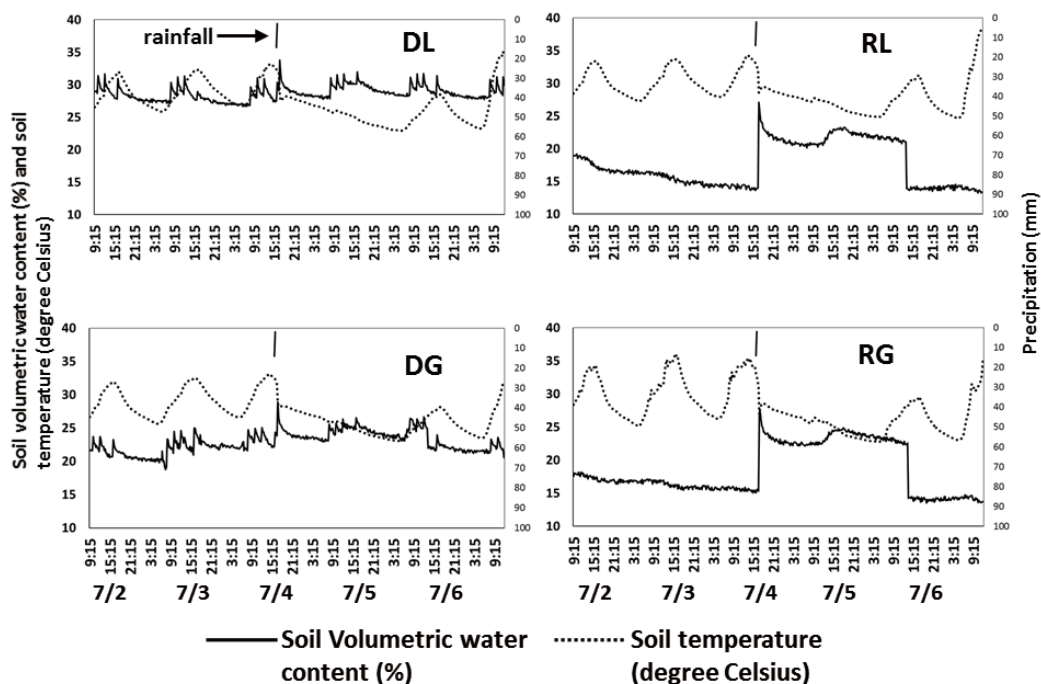
栽培管理としては、ドリップチューブを設置すると、普段使用している管理機アタッチメント型マルチャーではマルチを張ることができなくなったため、苗の定植時にはマルチを張らなかった。

しかし、雑草が増えてきたため、7 月 8 日に黒ポリエチレンマルチを畝の両脇から中央で合わせる形で張った。定植時の 5 月 13 日に支柱を立て、台風が迫ってきた 8 月 18 日に支柱を追加してピーマンが倒れないようにした。整枝は 4 本仕立てとし、1 番花より下の脇芽は摘みとり、葉も 1 番果収穫時に摘みとった。枝が広がってきてからは、畝の両脇に紐をはり、枝の重みを支えるようにした。農薬については、6 月 27 日にマラソン乳剤を 1 度散布したが、それ以降は何も使用しなかった。収穫については、6 月 8 日から始め、11 月 23 日で終了とした。週 3 回収穫作業を行い、収穫した果実については、生重量を全数計測し、その後 105°C で 48 時間乾燥させ、乾重量についても全数計測した。虫や病気、傷の具合についても、果実毎にチェックした。降雨については農園に雨量計を設置した。土壌水分、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 つずつ設置し、計測した。データの統計解析には IBM SPSS Statistics を使用した。

3. 結果

1) 降雨と土壌水分変化

試験地の降雨状況を図 1 に示した。2016 年の



Soil volumetric water content and soil temperature were measured with moisture sensors. Precipitation was measured with the tipping bucket type rain gauge.

図2 各プロットの典型的土壌水分および土壌温度変化

夏は雨の多い年だった。それは気象庁のデータからも明らかで、ここ30年の平均降水量が242 mm (8月), 257 mm (9月) なのに対し、2016年は412 mm (8月), 275 mm (9月) となっていた (気象庁統計)。とくに1 mm以上の降水のあった日が、2016年は8月に15日間、9月に16日間あり、2日に1回は雨が降っていた状態で、渇水状態と呼べる期間は一度も起きなかった。本研究でいう渇水状態とは、「梅雨明けから9月半ばまでに間に、2 mm以上の雨が降らなかった期間が8日以上連続した場合」と定義しており、八王子では2006年から2015年まで10年間毎年渇水状態が起きていた中であって、2016年だけは一度も起きなかった (気象庁統計)。

各試験区における土壌水分を見てみると、それぞれ特徴的な変化を示していた (図2)。DL区とDG区は、1日4回のドリップ灌漑が土壌水分の変化にはっきりと現れていた。7月4日に降雨があったが、その影響は小さく、常に体積含水率20~30%あたりで変動していることがわかる。一方、ドリップ灌漑をしていないRL区とRG区は、

降雨がないときは体積含水率15%あたりを維持しており、7月4日の降雨直後に30%近くまで上がり、その後再び15%ぐらいまで下がっていた。

土壌温度に関しては、すべての試験区で似たような変動を示していたが、1日4回ドリップ灌漑されるDL、DG区の方が、RL、RG区よりも若干温度が低い傾向にあった (図2)。

2) ドリップ灌漑の収量への影響

6月8日に初めての収穫があり、その後11月23日まで週3回収穫を続けた。

ピーマンの生長に関しては、4つの処理区のすべてにおいて順調であった。DL区とDG区は、平年より雨が多かった年に1日4回ドリップ灌漑をしており、栽培の全期間を通じて土壌が常に湿っている状態であった。それでも、根腐れなどの病気は観察されなかった。

「ドリップ灌漑の有無 (Drip 要因)」と「肥料の種類 (Fertilizer 要因)」の2要因について、二元配置の分散分析を行った結果、6月から11月までの総収穫量に関して「ドリップ灌漑の有無」

表1 二次元配置分散分析結果

variables	Drip (df=1,16)		Fertilizer (df=1,16)		Drip x Fertilizer (df=1,16)	
	F	P	F	P	F	P
Total fresh weight	14.478	0.002	0.035	0.853	1.639	0.219
Total dry weight	12.876	<0.001	0.344	0.566	1.047	0.321
monthly yield in June (fresh weight)	5.196	0.037	4.528	0.049	0.531	0.477
monthly yield in June (dry weight)	4.973	0.040	4.576	0.048	0.431	0.521
monthly yield in July (fresh weight)	5.883	0.027	1.554	0.230	0.363	0.555
monthly yield in September (fresh weight)	8.482	0.010	0.032	0.860	1.726	0.207
monthly yield in September (dry weight)	8.118	0.012	0.054	0.819	1.423	0.250
monthly yield in October (fresh weight)	19.869	<0.001	0.327	0.576	0.417	0.527
monthly yield in October (dry weight)	16.927	0.001	1.056	0.319	0.059	0.812
fruite number in September	7.419	0.015	0.037	0.851	1.130	0.304
fruite number in October	22.855	<0.001	1.013	0.329	0.094	0.763
total fruit number	11.472	0.004	0.073	0.790	1.247	0.281
rate of marketable fruits in July	18.723	0.001	1.069	0.317	0.155	0.699
rate of marketable fruits (total)	5.335	0.035	0.179	0.678	0.487	0.495

P-values in bold indicate significant differences between treatments ($P < 0.05$)

に差が見られ、「肥料の種類(固形肥料, 液体肥料)」および交互作用では差が見られなかった(表1)。

ドリップ灌漑をしたDL区, DG区が, ドリップ灌漑をしなかったRL区, RG区よりピーマンの総収穫量(生重量)が大きくなっていた(図3)。(二元配置の分散分析の結果, 交互作用が検出されなかったため, DLとDG, RLとRGはそれぞれ1グループとして差を表示している。)もっとも平均収量が小さかったRG区ともっとも平均収量の大きかったDG区を比較すると, 1.33倍の収量増になっていた。固形肥料と液体肥料のあいだで差は検出されず, それらの違いよりも, ドリップ装置により毎日決まった時間に灌水するかどうか, 収量に影響を与えていることがわかった。

乾重量については, 生重量よりも若干差が小さくなっているものの, 生重量と同様の傾向が見られた。つまり, ドリップ灌漑をしたDL区, DG区が, ドリップ灌漑をしなかったRL区, RG区より大きくなっていた(図3)。もっとも乾重量が小さかったRG区ともっとも乾重量の大きかったDG区を比較すると, 約1.29倍の増加となっていた。

月ごとの変動を示したのが図4である。収穫量は6月は少なく, 7, 8月で急増し, 9月で一旦下がるものの, また10月で増加し, 11月には急減していた。6, 7月の時点ですでにドリップ灌漑の

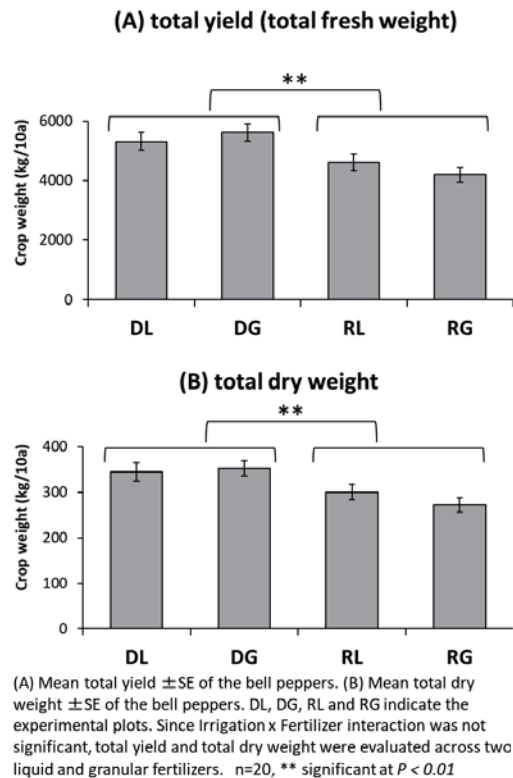
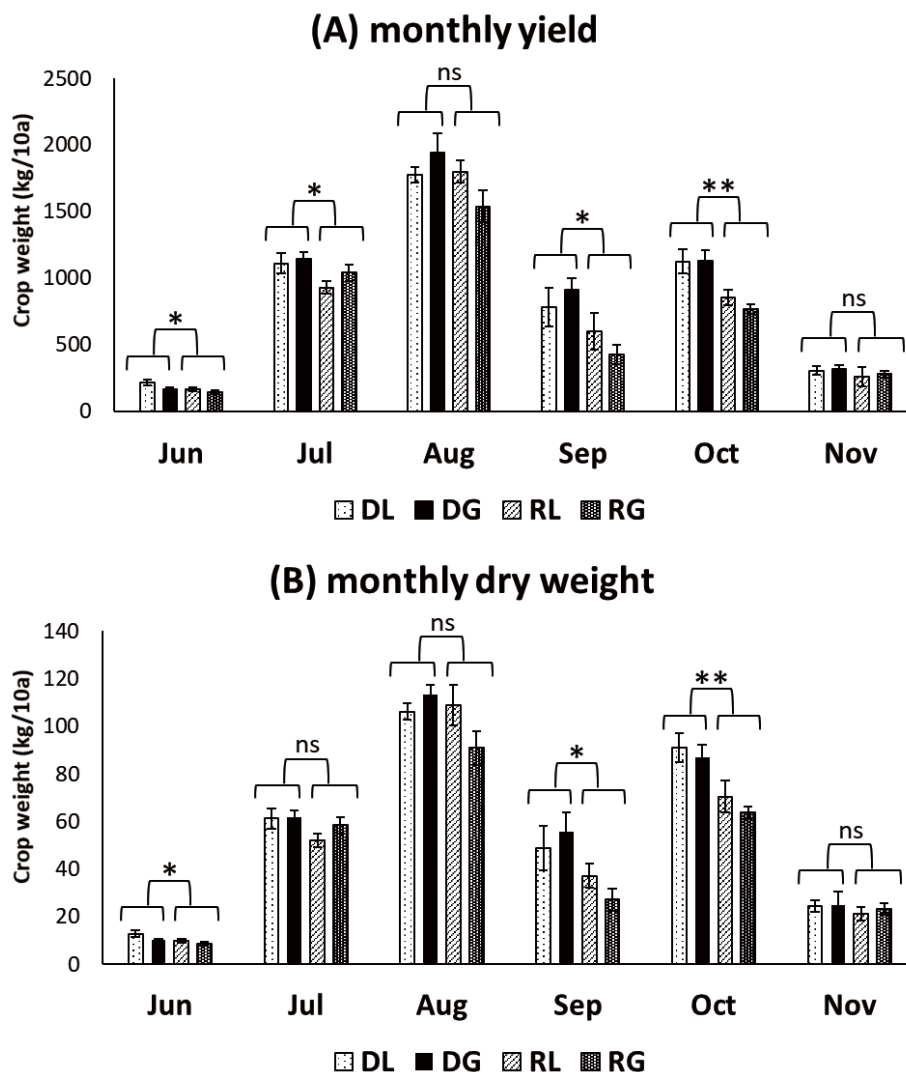


図3 ピーマン総収穫量(生重量)と乾重量の比較



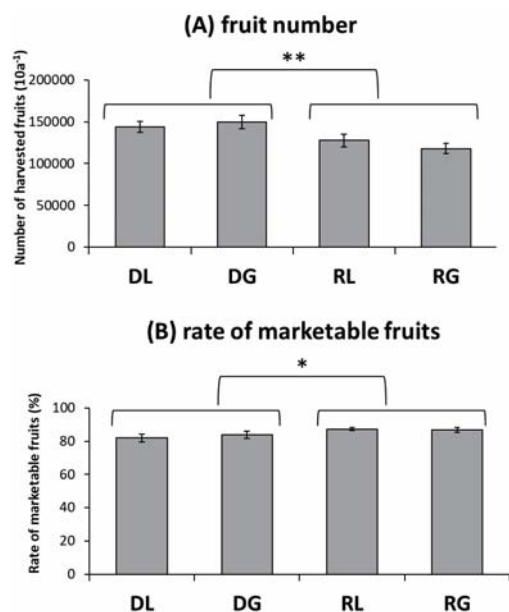
(A) Mean monthly yield $\pm$ SE of the bell peppers. (B) Mean monthly dry weight $\pm$ SE of the bell peppers. DL, DG, RL and RG indicate the experimental plots. Since Irrigation $\times$ Fertilizer interaction was not significant, total yield and total dry weight were evaluated across two liquid and granular fertilizers. $n=20$, ** significant at $P < 0.01$; * significant at $P < 0.05$; ns, not significant

図4 ピーマン月別収量と乾重量の変化

有無による収穫量の差が現れているが、もっとも収穫が多い8月には差が見られなくなっていた。しかし9、10月には、ドリップ灌漑の有無による差が大きく現れるようになっており、11月には、すべての処理区で着果数が減少し、可販果になる前に赤く熟して落下してしまうものが増えた。

3) ドリップ灌漑のピーマン個数、商品価値への影響

次に収穫されたピーマンの個数については、収量のとく同様の傾向が見られた(図5)。個数についても、「ドリップ灌漑の有無(Drip要因)」についてのみ差が検出され、「肥料の種類(Fertilizer要因)」および交互作用では差が見られなかった(表1)。ドリップ灌漑をしたDL区、DG区が、ド



(A) Mean fruit number $\pm$ SE of the bell peppers. (B) Mean rate of marketable fruits $\pm$ SE of the bell peppers. DL, DG, RL and RG indicate the experimental plots. Since Irrigation $\times$ Fertilizer interaction was not significant, total yield and total dry weight were evaluated across two liquid and granular fertilizers. $n=20$, ** significant at $P < 0.01$; * significant at $P < 0.05$

図5 ピーマン果実数と販売可能割合の比較

リップ灌漑をしなかった RL 区, RG 区より収穫されたピーマン個数が多かった。より詳細に見てみると, 9, 10 月に DL 区, DG 区の収穫個数が有意に多くなっていた (表 1)。つまり, 先に示した収量の増加は, 一つ一つのピーマンの大きさが増加したためではなく, 収穫できたピーマンの個数がとくに秋に増えたということがわかる。

一方, 商品として販売可能なピーマン (可販果) の割合 (重さではなく個数から計算している) については, 4 つの処理区とも, 全体としておよそ 8 割が販売可能なものになっていた。ただごくわずかな差ではあるが, ドリップ灌漑をした DL 区, DG 区が, ドリップ灌漑をしなかった RL 区, RG 区より, 可販果割合が低くなっていた (図 5)。つまり不良果の割合が多くなっており, その差は月別に見ると, 7 月のみで有意差が現れていた (表 1)。不良果の原因としては, 病害や食害は少なく, ほとんどが変形, 傷, 変色 (早期に赤く熟す) などであった。

4. 考察

本研究から明らかになった結果を整理してみると, ドリップ灌漑によってピーマンの収量が増加したという点がまず挙げられる。その収量の増加は, 具体的には 9, 10 月の収穫個数の増加によるものであった (表 1, 図 4)。秋にドリップ灌漑の効果が顕著に表れるという傾向は, 木下 (2006) による茶の実験でも示されており, 点滴によって夏から秋にかけての茶の生育がおう盛となり, 新芽の伸びもおう盛になったと報告されている。

この年は平年より降雨が多く, 渇水期間が生じなかったにもかかわらず, ドリップ灌漑により収量が増加したので, 渇水期間が起きる平年の状況ならば, ドリップの有無による収量の差はより大きくなるものと期待される。

生重量と乾重量はほぼ同じ傾向を示していることから, ドリップ灌漑によってピーマンが水分過多になったのではなく, 純粋に果実の収量が増加したようであった。収量増加の形としては, 一つ一つの果実が大きくなるのではなく, 収穫できた果実数が増えていた。ただ若干の差ではあるものの, ドリップ灌漑した DL 区, DG 区はドリップ灌漑をいかなかった RL 区, RG 区よりも可販果割合が減っていたので, ドリップ灌漑は収量を増加させるが, 同時に不良果の割合も若干増加させてしまっているようであった。今後の課題と思われる。

なぜドリップ灌漑により収量が増えたのか, とくになぜ着果数が増えたのか, そのメカニズムを考察してみる。まず一般に言われているドリップ灌漑の利点には, 次のような作用が挙げられる。灌漑水の節約, 減肥効果, 窒素流出減少, 水利用効率の増大, 整地 (水平化) 不要, 起伏地への灌漑, リサイクル水の利用, 圃場容水量の維持, 雑草減少, 土づくり不要, 土壌浸食防止, 低コスト, 水コントロールの容易さ, 液体肥料混入 (ファertiゲイション) の容易さ, 地上部乾燥による病害軽減などである (Kaushal et al. 2015)。

本研究の場合は, これらの作用に加えて, 灌水頻度が収量および着果数に影響したのではないかと考えられる。灌水量と作物の収量との間には, 正の相関関係があることが, 海外の多くの研究から示されている (Payero et al. 2006, Istanbuloglu et al. 2002)。ただその両者が直線的な関係にあるのは, 作物に強度の水ストレスがか

かっている場合だけであり、十分な水分が与えられている場合には、灌水量と収量との間に明確な関係性が見いだせないことが多く (Greaves and Wang 2017, Imtiyaz et al. 2000), むしろ多量の灌漑が害になるとの報告もある (Segal et al. 2006). 本研究の場合は、図 1 に示したように、8, 9 月は平均して 2 日に 1 回は雨が降るほど多雨な年であったため、灌漑をしていない RL, RG 区においても、強度の水ストレスが発生していたとは考えられず、灌水量そのものが収量増加に与えた影響は小さいと思われる。

ドリップ灌漑については、灌水量の他にも、灌水頻度が生長に大きく影響してくることが知られている。数日に 1 回の灌水よりも、毎日灌水した方が、ピーマンの生長がよくなり、収量も増すことが報告されている (Sung et al. 2005, Ruiz-Lau et al. 2011, Valiente-Banuet et al. 2016). とくに Sezen et al. (2011) が行った実験では、灌水量と灌水インターバルを様々に変化させて実験したところ、ピーマンの着果数・数量ともに最大となったのは、灌水量が最大かつインターバルが最小 (高頻度灌水) の実験区であった。逆に着果数・収量とも最小になったのは、灌水量が最小かつインターバルが最大 (低頻度灌水) の実験区であった。これは、本研究の結果とも一致しており、RL, RG 区での水分供給は数日に 1 回の降雨のみであったのに対し、DL, DG 区はドリップ灌漑により 1 日 4 回散水しており、その灌水頻度の違いが着果数の増加、ひいては収量増加に影響したのではないかと考えられる。

灌水頻度が増すと収量が増加する理由については、根面境界層の理論が関係している可能性がある。根面境界層の理論とは、土壌中の水の移動や無機要素の拡散速度は極めて遅いため、一般的な栽培では養水分の供給が作物の吸収に追いつかず、根の表面に無機要素濃度の薄い層 (根面境界層) が形成されてしまうというものであり、少量多頻度の灌水を行うことで根面境界層の形成を抑制できるとされている (荒木 2007, 石井ら 2007). つまり本研究の RL, RG 区では、土壌水分計の数値自体は十分なものであったが、ピーマンの根が周囲の水分と養分を吸収してしまうと、窒素、リンなどの無機養分はその移動速度についていけず、根の周囲に無機養分の濃度が低い層 (根面境界層) ができてしまい、肥料の利用効率が悪くなっ

てしまっていた可能性がある。それに対し DL, DG 区では、ドリップ灌漑により根の周囲を高頻度に水が流れる状況で、それにより根面境界層の形成が抑制され、肥料 (固形肥料、液体肥料ともに) の利用効率が向上し、作物が要求するだけの養分を随時供給できる状況となり、それが収量および着果数の増加につながったと考えられる。

以上のように、本研究から示唆されたことは、日本の露地のように降雨が十分にあり、土壌水分も十分にあると判断される場所であっても、ドリップ装置などで毎日定期的に灌水することで、さらなる増収が期待できるということである。実際、イスラエルで農業関係者にインタビューしたところ、「ヨーロッパやイスラエルでは、たとえ雨季であっても、露地でのドリップ灌漑を続ける」と述べていた。その理由は「雨季でも灌漑することで、さらなる増収が望めるから」とのことであった。日本もそのような視点から、露地へのドリップ灌漑導入することで、さらなる増収が期待できると考える。その際、本実験で示されたように、日本のように養分が豊富な土壌においては、液体肥料を混入するドリップ・ファーターゲイションだけでなく、固形肥料とドリップ灌漑 (水のみ) を組み合わせた形でも、同様の増収が期待される。

引用文献

- 荒木雅登・林田達也・井手治他 (2005) : 促成トマートの養液土耕栽培における窒素施用量とかん水量の違いが収量、品質に及ぼす影響, 誌名福岡県農業総合試験場研究報告 24 ; 16-22.
- 荒木陽一 (2007) : 多頻度給液方式による養液土耕栽培の減肥効果の向上, 農業および園芸 第. 82 (4) ; 475-481.
- Dogan E, Kirnak H, Berekatoglu K, Bilgel L, Surucu A (2008) : Water stress imposed on muskmelon (*Cucumis Melo L.*) with subsurface and surface drip irrigation systems under semi-arid climatic conditions. *Irrig. Sci.* 26 ; 131-38.
- Donk S J, Petersen J L, Davison D R (2013) : Effect of amount and timing about subsurface drip irrigation on corn yield. *Irrig. Sci.* 31 ; 599-609.
- 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.

- Greaves G E and Wang Y M (2017) : Yield response, water productivity, and seasonal water production functions for maize under deficit irrigation water management in southern Taiwan. *Plant Production Science* 20(4) : 353-365.
- ICID (2016) : Annual report 2015-16. International Commission on Irrigation and Drainage. pp.75-82.
- Imtiyaz M, Mgadla N P, Manase K, Chendo K, Mothobi E O (2000) : Yield and economic return of vegetable crops under variable irrigation. *Irrig. Sci.* 19 : 87-93.
- 井上恵子・山本富三・柴戸靖志他 (2003) : 促成ナスの養液土耕栽培における施肥およびかん水方法, 福岡県農業総合試験場研究報告 22 : 69-74.
- 石井友紀子・小松めぐみ (2007) : 根面境界層の形成を抑制する新しい養水分管理技術の確立 3)「根面境界層抑制システム」を利用する栽培技術の確立 (2)施設栽培への適応性 (バラ)ア)ロックウール栽培での養水分管理 i)培地内水分率と給排水量の推移, 宮城県農業・園芸総合研究所成績概要書, 2007 : 170-171.
- Istanbulluoglu A, Kocaman I, Konukcu F (2002) : Water use-production relationship of maize under Tekirdag conditions in Turkey. *Pak J. Biol. Sci.* 5(3) : 287-291.
- Kaushal A, Lodhi A S, Singh K G (2011) : Economics of growing sweet pepper under low tunnels. *Progressive Agriculture*, 11(1) : 67-72.
- Kaushal A, Patole R, Singh K G (2015) : Micro irrigated sugarcane in India : A review. In *Best Management Practice for Drip Irrigated Crops*, (Singh et al ed.) Apple Academic Press (Oakville) pp.91-104.
- 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.
- 気象庁統計 : <http://www.jma.go.jp/jma/menu/report.html>.
- Kong Q, Li G, Wang Y, Huo H (2012) : Bell pepper response to surface and subsurface drip irrigation under different fertigation levels. *Irrig. Sci.* 30 : 233-245.
- 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.
- Locascio S J, Myers J M (1974) : Tomato response to plug-mix, mulch and irrigation method. Annual meeting of the Florida State Horticultural Society 1974 : 126-130.
- Lodhi A S, Kaushal A, Singh K G (2016) : Performance of sweet pepper under low tunnel technology. In *Best Management Practice for Drip Irrigated Crops*, (Singh et al ed.) Apple Academic Press (Oakville) pp.11-32.
- 満田幸恵・山本富三・荒木雅登 (2005) : 促成ナスの点滴かん水施肥 (養液土耕)栽培における生育および収量と窒素の動態, 日本土壤肥料学雑誌 76 : 9-14.
- Mohammad M J, Zuraiqi S, Quasmeh W, Papadopoulos I (1999) : Yield response and nitrogen utilization efficiency by dripirrigated potato. *Nutr. Cycl. Agroecosyst.* 54 : 243-249.
- 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.
- 長友 誠・上之蘭茂・上蘭一郎 (2001) : 促成ピーマンのかん水施肥による減肥栽培鹿児島農試研報 29 : 39-45.
- 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.
- Payero J O, Melvin S R, Irmak S, Tarkalson D (2006) : Yield response of corn to deficit irrigation in a semiarid climate. *Agric Water Manage* 84 : 101-112.
- Pascual-Seva N, San Bautista A, López-Galarza S, Maroto J V, Pascual B (2015) : Response of nutsedge (*Cyperus esculentus* L. var *sativus* Boeck.) tuber production to drip irrigation based on volumetric soil water content. *Irrig. Sci.* 33 : 31-42.
- Patel N, Rajput T B S (2009) : Effect of subsurface drip irrigation on onion yield, *Irrig. Sci.* 27 : 97-108.
- Phogat V, Mahadevan M, Skewes M, Cox J W (2012) : Modelling soil water and salt dynamics under pulsed and continuous surface drip

- irrigation of almond and implications of system design. *Irrig. Sci.* 30 : 315-333.
- 六本木和夫 (1995) : 養液土耕による施設栽培キュウリの養水分管理, 農及園 70 : 909-12.
- 六本木和夫・加藤俊博 (2000) : 野菜・花卉の養液土耕, 農文協.
- Ruiz-Lau N, Medina-Lara F, Minero-García Y, Zamudio-Moreno E, Guzman-Antonio A, Echevarría-Machado I, and Martínez-Estevéz M (2011) : Water deficit affects the accumulation of capsaicinoids in fruits of *Capsicum chinense* Jacq. *HortScience* 46 : 487-492.
- 斎藤俊久・糠谷 明 (1999) : トマトの点滴施肥灌水栽培における施肥量の違いが生育および養分吸収に及ぼす影響, 静岡大学農学部研究報告 48 : 39-45.
- 坂口雅己・日笠裕治・中住晴彦 (2013) : 夏秋どりトマトの点滴灌水施肥 (養液土耕) における果実生産と施肥窒素利用率からみた生育時期別の適正窒素施肥量, 日本土壤肥料学雑誌 84 (1) : 11-20.
- 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.
- 佐藤達雄・古郡 透・高柳りか・米山 裕 (2005) : 葉数をもとにした簡易窒素施肥指標によるキュウリのかん水同時施肥栽培の現地導入効果, 農作業研究 40 (2) : 73-78.
- Segal E, Ben-Gal A, Shani U (2006) : Root water uptake efficiency under ultra-high irrigation frequency. *Plant and Soil* 282 : 333-341.
- Sezen S M, Yazar A, Tekin S, Eker S, Kapur B (2011) : Yield and quality response of drip-irrigated pepper under Mediterranean climatic conditions to various water regimes. *African Journal of Biotechnology* 10 (8) : 1329-1339.
- Simon J D, Petersen J L, Davison D R (2013) : Effect of amount and timing of subsurface drip irrigation on corn yield. *Irrig. Sci.* 31 : 599-609.
- 白井一則・辻 浩孝・木下忠孝 (2006) : てん茶の点滴施肥栽培における自動灌水制御器による節水灌漑, 愛知県農業総合試験場研究報告 38 : 147-153.
- 白井一則・辻 正樹・樋江井清隆・辻 浩隆・木下忠孝 (2010) : てん茶園における点滴施肥の長期継続栽培の可能性, 愛知県農業総合試験場研究報告 42 : 163-170.
- Sivanappan R K, Padmakumari O (2016) : Principles of drip/micro or trickle irrigation. In *Water and Fertigation Management in Micro Irrigation*. (Goyal ed.) Apple Academic Press. (Oakville). pp.35-106.
- 菅沼健二 (1999) : 現地温室における点滴施肥栽培トマトの生育, 愛知県農業総合試験場研究報告 31 : 103-110.
- Sung Y, Chang Y Y, Ting N L (2005) : Capsaicin biosynthesis in water stressed hot pepper fruits. *Bot. Bull. Acad. Sin.* 46 : 35-42.
- 竹内真一・安田 繁・河原田禮次郎・矢野友久 (1998) : 作物の蒸散量を指標としたハウス内ピーマンの灌漑管理—茎内流測定法の灌漑管理への適用 (1)—, 農業土木学会論文集 194 : 41-49.
- 東京都産業労働局農林水産部 (2017) : 農作物施肥基準, 穀類・野菜・果樹・花き・茶, http://www.maff.go.jp/j/seisan/kankyo/hozen_type/h_sehi_kizyun/tokyo01.html
- 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.
- Valiente-Banuet J I, Gutierrez-Ochoa A (2016) : Effect of Irrigation Frequency and Shade Levels on Vegetative Growth, Yield, and Fruit Quality of Piquin Pepper (*Capsicum annuum* L. var. *glabriusculum*). *HortScience* 51 (5) : 573-579.
- 山崎晴民・六本木和夫 (2002) : 養液土耕 (灌水同時施肥) による半促成ナス栽培における効率的施肥技術, 埼玉県農林総合研究センター研究報告 2 : 36-42.
- 安岡由紀・行 弘恵・松岡俊二他 (2005) : ピーマンの促成栽培における点滴かん水施肥技術, 高知県農業技術センター研究報告 14 : 37-46.

Abstract

Although the drip irrigation technique has become widespread worldwide, and especially in Europe and Israel, it is used for only 2 percent of the total irrigated land in Japan. Because Japan receives sufficient rainfall throughout the year, farmers apparently do not consider it necessary to use an additional irrigation in open fields, except during occasional, extreme droughts. This study, however, verifies the hypothesis that using a drip irrigation technique can increase crop yields even in Japan's open fields. A split-design experiment was conducted maintaining two irrigation treatments as main factor inputs and two different fertilizers as sub-factor

inputs. The bell pepper was used as a test crop. The results showed that the crop yield, dry weight, and number of fruits increased in the drip-irrigated plots compared with the non-irrigated plots, regardless of fertilizer used. The crop yield differed significantly, especially in September and October when crop yields usually begin to decline. The most significant factor affecting the results appear to be the frequency of irrigation. This study indicates that if water is supplied daily to the crop using a drip irrigation technique, crop yields can be increased even in the open fields of Japan that receive sufficient rainfall.

Key Words

drip fertigation, drip irrigation, open fields, yield