

トマト青枯病の太陽熱土壌消毒における栽培管理用水量の実態

誌名	農業農村工学会論文集
ISSN	18822789
著者名	戴,燕燕 近藤,美麻 伊藤,健吾 吉山,浩平 張,鵬飛 張,福平 千家,正照
発行元	農業農村工学会
巻/号	82巻6号
巻号補足	
掲載ページ	p. 433-440
発行年月	2014年12月

農林水産省 農林水産技術会議事務局筑波産学連携支援センター

Tsukuba Business-Academia Cooperation Support Center, Agriculture, Forestry and Fisheries Research Council
Secretariat



トマト青枯病の太陽熱土壌消毒における 栽培管理用水量の実態

戴 燕燕* 近藤美麻* 伊藤健吾** 吉山浩平***
張 鵬飛* 張 福平**** 千家正照**

* 岐阜大学大学院連合農学研究科, 〒501-1193 岐阜市柳戸 1-1

** 岐阜大学応用生物科学部, 〒501-1193 岐阜市柳戸 1-1

*** 岐阜大学流域圏科学研究センター, 〒501-1193 岐阜市柳戸 1-1

**** 陝西師範大学旅游与環境学院, 〒710119 中国・陝西省西安市

要 旨

本研究では、トマト青枯病に対する太陽熱土壌消毒に必要な栽培管理用水量の基礎的な知見を得ることを目的とし、岐阜県海津市内の6ハウスを対象にして灌水量や土壌温度、土壌消毒前後の青枯病菌数等を調査した。その結果、ハウスの密閉状態、ハウス内外の気温差、消毒期間の長さ、期間中の気象条件が地温の上昇に影響することを明らかにした。一般に、青枯病菌を死滅させるためには、日平均地温が40℃以上で連続して10日間、あるいは還元処理を併用して3日以上維持することが必要とされている。調査の結果、この条件を満たしたときに消毒後の菌数は著しく減少し、十分な消毒効果を確認した。また、消毒効果が確認された2ハウスの調査結果から、太陽熱土壌消毒に使用された栽培管理用水量は155.6~495.2mm(平均:291.3mm)であり、それは間隙飽和に必要な水量の104~346%(平均:218%)に相当することが明らかになった。

キーワード: 太陽熱土壌消毒, 陽熱還元消毒, 土壌温度, 青枯病, 栽培管理用水量

1. はじめに

トマトは日本で最も生産額の高い野菜であるが、近年、施設栽培の普及に伴って青枯病を中心とした土壌病害が深刻な収量低下を引き起す原因となっている。以前は、臭化メチルが多くの病害虫に対して安定した効果を有することや農作物への薬害が少ないことから、土壌消毒や収獲物消毒の多くの場面で使用されてきた。しかし、1992年にモントリオール議定書締約国会合で臭化メチルがオゾン層破壊物質に指定され、先進国では2005年に全廃することが決定された。臭化メチル剤に代わる土壌消毒法の開発と普及は国内外を問わず重要な課題となっており(Martin, 2003)、環境に優しい物理的防除法として、用水と太陽熱による土壌消毒が行われるようになった。

太陽熱土壌消毒に関する従来の研究では、消毒効果に関するものが多く、キュウリつる割病、ピーマン疫病、エンドウ立枯病、キュウリ・トマトのネコブセンチュウに対しては高い防除効果があることが確認されている(農林水産省農業研究センター, 1982)。また、土壌温度については、マルチや透明トンネルによる保温効果(Garofalakis et al., 2006)の検討が進められてきた。しかし、実際の太陽熱土壌消毒で、灌水量や気象条件が地温の上昇や消毒効果に与える影響に注目した研究例(江種ら, 2008; Al-Kayssi et al.,

1990; Al-Karaghoul and Al-Kayssi, 2001)は少なく、灌水量や気象条件が地温の上昇や消毒効果に与える影響について、その実態は明らかになっていない。

一方、日本の畑地用水計画では、作物生育のための土壌水分補給以外の用水、つまり栽培管理用水が色々な目的で使用されている。その中でもハウス栽培の端境期に使用される栽培管理用水(土壌消毒用水、定植播種前の用水など)は、作物に水分を補給する本来の目的の灌漑用水と比較しても使用水量が大きく、用水計画や既存施設の評価・更新を行う際にその実態を把握することが重要となっている。

本研究では、太陽熱土壌消毒に必要な栽培管理用水量の基礎的な知見を得ることを目的として、土壌消毒を実施しているハウスを対象に調査し、灌水量や土壌温度、及び土壌消毒前後の青枯病菌数等の分析を行った。本報は、その結果について報告するものである。

2. 調査の概要

2.1 太陽熱土壌消毒

太陽熱土壌消毒法は、7~8月の気温の高い時期に十分な灌水を行った後、ビニール等で土壌表面を覆うことにより、土壌を高温、過湿状態にすることで土壌中の病害虫を死滅させる技術であり(Horowitz et al., 1983; Abdallah, 1991),

農薬を使用しないため環境への負荷も少なく、安全・安心で人畜への影響も少ない方法である。この技術は1970年代中頃に開発され、Katan et al. (1976) によって最初に詳細な科学的な記載が行われた。日本では奈良県農業試験場において先進的に進められ(小玉ら, 1980), 簡便で低コストのため既に全国規模で普及している。

一方、陽熱還元消毒法とは太陽熱土壌消毒法の一種で、消毒効果をさらに高めるために、ふすまや糖蜜を土壌に混和した後、太陽熱土壌消毒法と同様に灌水・被覆して、増殖した微生物の活動によって酸素を消費し、土壌をより完全な還元状態に近づける方法である。

2.2 調査圃場の概要

本調査圃場のある海津市は、岐阜県の最南端に位置し、西部を揖斐川、東部を木曽・長良川によって挟まれている。この地域を管轄しているJAにしみの管内(海津市、養老町を中心にその周辺地域)では、1956年よりトマト栽培が始まり、現在の栽培面積は約30haに達し、冬春トマトの生産量は県内一である。この地域では、太陽熱土壌消毒が約30年前から始められ、2003年には「ぎふクリーン農業」に登録され(JAにしみの、参照2013.6.15)、トマト部会全員により農薬の使用回数を減らす取り組みが実施されている。

対象としたのは岐阜県海津市内の転換畑に建てられた6ハウスで、2010~2012年の夏季に調査を実施した。2010年はハウス2棟(A1, B), 2011年はハウス3棟(A1, A2, B), 2012年はハウス6棟(A1, A2, B~E)で調査を実施した。A1, A2は同じ耕作者であるが、その他のハウスは耕作者が異なる。各ハウスの概要をTable 1に示す。栽培作物は冬春トマトの桃太郎Jと麗容の2品種で、ハウス内は同一の品種が作付けされている。A1ハウスの一部(A1②)とA2ハウスで陽熱還元消毒法を適用した。A1②では2012年に糖蜜を、A2ハウスでは2011年には糖蜜、2012年にふすまを土壌に混入し、還元消毒を行った。

各圃場における土壌の物理性についてTable 2に示した。国際土壌学会法による土性分類では、シルト質壤土(SiL)と壤土(L)が多く分布していたが、A2ハウスのみシルト質壇壤土(SiCL)がみられた。乾燥密度及び土粒子密度は下層に向かって増大する。また、室内における変水位透水実験の結果、下層に向かって透水係数は小さくなることが明らかになった。いずれの圃場も転換畑で、水稻作付け時に形成された耕盤と思われる透水性の低い層が35cm深付近に存在しているが、Bハウスでは、全層にわたり透水性が比較的高かった。

2.3 調査項目

各圃場内の1地点で、深さ5, 15, 25, 35, 50, 70cmに温度計(T&D おんどとり Jr), 土壌水分センサー(DECAGON ECH20 HC-5)を設置し、土壌温度と体積含水率を測定した。各圃場のほぼ中央の1ヵ所で、圃場面から1.5mの高さでハウス内温度を、また、同地点で圃場面から1mの深さまで塩ビパイプを挿入し、地下水位を水

Table 1 調査圃場の概要
The outline of test fields

圃場	間口(m)×連棟数 ×奥行(m)×高さ (肩~頂点)(m)	ハウスのタイプ(構造・ 被覆材料・向き)	実施年
A1	5.5×7×35× 2.0~3.2	7連棟丸屋根型パイプハ ウス・農PO・東西棟	2010~2012
A2	10.8×3×63× 2.5~4.6	3連棟両屋根型鉄骨ハウ ス・農PO・東西棟	2011~2012
B	10.8×3×63× 2.4~4.7	3連棟両屋根型鉄骨ハウ ス・フッ素・南北棟	2010~2012
C	5.4×10×48× 1.9~3.0	10連棟丸屋根型パイプハ ウス・農PO・南北棟	2012
D	4.2×10×31× 3.8~5.0	10連棟丸屋根型鉄骨ハウ ス・農PO・南北棟	2012
E	10.8×4×36× 2.7~4.7	4連棟両屋根型鉄骨ハウ ス・PET・南北棟	2012

注) 被覆資材: 農業用ポリオレフィン系特殊フィルムは“農PO”, フッ素フィルムは“フッ素”, ポリエステルフィルムは“PET”とした。

Table 2 土壌の物理性
Physical properties of soil

圃場	深さ (cm)	土性 分類	乾燥密度 (g・cm ⁻³)	土粒子密度 (g・cm ⁻³)	透水係数 (cm・s ⁻¹)
A1	5	SiL	1.03	2.586	2.14×10 ⁻³
	15	SiL	1.07	2.635	1.45×10 ⁻³
	25	SiL	1.18	2.654	2.74×10 ⁻³
	35	SiL	1.33	2.658	4.62×10 ⁻⁴
	50	SiL	1.35	2.663	2.08×10 ⁻⁴
	70	SiL	1.30	2.659	4.10×10 ⁻⁶
A2	5	SiL	0.96	2.611	3.79×10 ⁻²
	15	SiCL	0.98	2.649	1.65×10 ⁻³
	25	SiCL	1.06	2.657	1.09×10 ⁻³
	35	SiCL	1.12	2.660	4.06×10 ⁻⁵
	50	SiL	1.28	2.683	1.90×10 ⁻⁴
	70	SiCL	1.31	2.667	1.01×10 ⁻⁵
B	5	L	1.02	2.595	5.73×10 ⁻²
	15	L	1.13	2.641	1.73×10 ⁻²
	25	SiL	1.21	2.654	1.96×10 ⁻³
	35	SiL	1.36	2.655	4.72×10 ⁻⁴
	50	L	1.40	2.661	3.33×10 ⁻³
	70	L	1.57	2.658	3.50×10 ⁻³
C	5	SiL	1.00	2.624	5.12×10 ⁻³
	15	SiL	1.18	2.637	1.51×10 ⁻³
	25	SiL	1.36	2.653	3.52×10 ⁻⁴
	35	SiL	1.49	2.664	2.03×10 ⁻⁴
	50	SL	1.35	2.675	1.45×10 ⁻³
	70	SiL	1.34	2.671	4.13×10 ⁻⁴
D	5	L	1.04	2.589	5.96×10 ⁻³
	15	L	1.08	2.631	3.38×10 ⁻³
	25	L	1.30	2.655	1.10×10 ⁻³
	35	L	1.37	2.658	5.77×10 ⁻⁵
	50	L	1.46	2.673	6.26×10 ⁻⁴
	70	L	1.15	2.562	1.83×10 ⁻²
E	5	L	1.22	2.643	1.05×10 ⁻²
	25	L	1.32	2.668	7.76×10 ⁻³
	35	L	1.44	2.670	3.72×10 ⁻⁴
	50	L	1.35	2.677	2.25×10 ⁻³
	70	SiL	1.28	2.674	3.08×10 ⁻⁵

注) 表中の「土性分類」は国際土壌学会法による

位計 (HOBO U20 ウォーターレベルロガー) で測定した。以上の項目の測定間隔は 10 分とした。圃場内で使用した用水量を把握するために、給水栓あるいは井戸からの配管途中に流量計を設置した。なお、この地域の気象データとして、近隣の愛知県愛西市にあるアメダスデータ (気温, 降水量, 日照時間) を参照した。また、土壌消毒の効果を確認するために、各ハウス 2 ヶ所で土壌試料を採取し、青枯病菌の生息密度を消毒前後の 2 回調査した。青枯病菌は深さ 15, 35, 50cm から約 10g の土壌試料を採取し、選択性培地の一つである TZC 培地を用いた培養実験により検出した。各サンプリング地点における土壌懸濁液を滅菌水で 10^1 , 10^2 , 10^3 倍の 3 段階希釈し、各段階につき 3 枚の平板培地を用いた。土壌消毒期間における土壌の酸化還元状態を把握するために、2012 年の A1 ハウス内の太陽熱消毒区と陽熱還元消毒区において深さ 5, 15cm の地温の測定地点で酸化還元電位 (Eh) を 24 時間ごとに計測した。

3. 結果及び考察

3.1 土壌消毒日数と気象状況

各調査ハウスの消毒日数と期間内のハウス外気象状況 (平均外気温, 日照時間, 日射量) を Table 3 に示す。なお、日射量は日照時間及び緯度から求めた可照時間から算出した値である (農林水産省構造改善局, 1997)。6 ハウスの 3 年間で行われた計 11 回の土壌消毒は、7 月 13 日～9 月 12 日の期間内の 18～33 日間 (平均 24 日間) で実施しており、2012 年の E ハウスと D ハウスの消毒期間が 18 日、19 日と短く、2010 年の A1 ハウスが 33 日と最も長かった。消毒期間中のハウス外の平均気温は 28.1°C であったが、2011 年の A2 ハウスで最も低く 26.9°C 、次いで 2012 年の C ハウスが 27.2°C と低かったのに対し、他のハウスの消毒期間は $27.9\sim 28.8^{\circ}\text{C}$ の範囲であった。消毒期間中の平均日射量は $15.7\sim 22.0\text{MJ}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$ (平均 $18.2\text{MJ}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$) の範囲にあり、2011 年の A2 ハウスの消毒期間における日射量が $15.7\text{MJ}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$ と最も低かった。

3.2 ハウス内気温

ハウス内気温は、外気温、日射量などの気象要因の他、ハウスの構造、向きと被覆資材などによって変化するが、ハウスを密閉した状態が続くほど内外気温差が大きくなる (城間, 1971)。また、ハウス内気温は地温と直接関係するので、太陽熱土壌消毒の效果に大きく影響する重要な要因と考えられる。そこで、Fig.1 に各ハウスの消毒期間中におけるハウス内外の日平均気温の変化を示す。

ハウス内気温は外気温と比較して高い。消毒期間中のハウス内の日平均気温は消毒開始から徐々に上昇していくが、降雨や曇天によって日照時間が短くなると低下していた。好天日が続くと高温になっており、日平均気温が 45°C を超える日も見られ、日中の気温は 55°C を超えていた。ハウス内外の日平均気温差の最高値についてみると、計 11 回の土壌消毒中 9 回で 10°C 以上 ($11.7\sim 16.4^{\circ}\text{C}$) に達していた

が、2012 年の C ハウスと D ハウスはそれぞれ 6.7°C , 7.9°C と他のハウスと比較して極端に小さい。この両ハウスでは元々青枯病の発生がなかったことから、営農者の太陽熱土

Table 3 各ハウスの土壌消毒日数とハウス外気象状況
Days of solarization period and climatic conditions outside glasshouse

圃場	消毒期間	日数	平均気温 ($^{\circ}\text{C}$)	日照時間 ($\text{h}\cdot\text{d}^{-1}$)	日射量 ($\text{MJ}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$)
A1	2010/7/28~8/29	33	28.8	6.9	17.4
	2011/8/1~8/24	24	28.1	6.4	16.2
	2012/7/29~8/24	27	28.2	8.4	20.0
A2	2011/7/13~8/5	24	26.9	5.7	15.7
	2012/7/13~8/4	23	28.1	7.5	18.4
B	2010/8/5~8/29	25	28.8	7.1	17.8
	2011/7/28~8/24	28	28.0	6.4	16.0
	2012/8/4~8/24	21	27.9	8.0	19.3
C	2012/8/23~9/12	21	27.2	6.8	17.3
D	2012/7/24~8/11	19	28.8	9.5	22.0
E	2012/7/18~8/4	18	28.3	8.4	20.3
平均	-	24	28.1	7.4	18.2

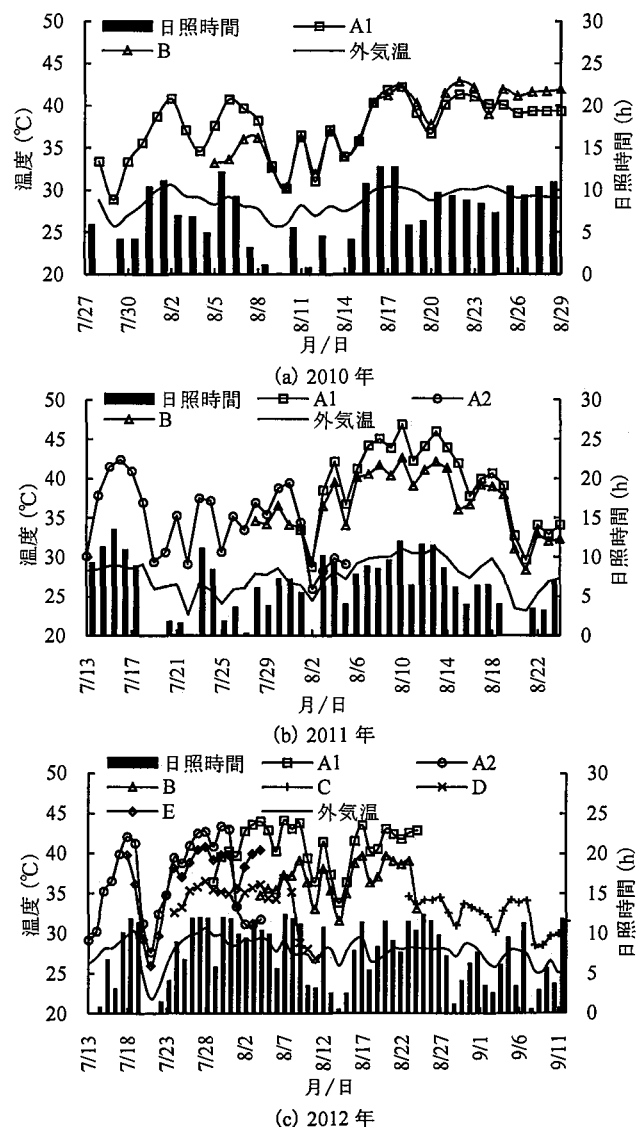


Fig.1 各調査ハウスの消毒期間中の内外日平均気温と日照時間
Daily average temperature inside and outside glasshouse and daylight hours during solarization periods

Table 4 各ハウスの日平均地温が基準温度40℃に達した最大連続日数 (単位: 日)
Maximum consecutive days of daily average soil temperature reaching the standard temperature 40 in each glasshouse (days)

圃場	年	A1				A2		B			C	D	E
		2010	2011	2012		2011*	2012*	2010	2011	2012	2012	2012	2012
				①	②*								
深さ (cm)	5	13	14	14	14	4	7	14	18	9	0	3	5
	15	11	10	13	13	1	5	13	17	8	0	1	2
	25	—	9	11	11	0	1	12	16	4	0	0	0
	35	0	7	7	7	0	0	8	14	0	0	0	0
	50	0	2	1	2	0	0	1	11	0	0	0	0
	70	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

注) 日平均地温が基準温度40℃を連続して超えた日数が死滅日数に達した場合は網掛け表示。*は陽熱還元消毒で、基準温度40℃で連続3日、それ以外は太陽熱消毒で連続10日である。

壤消毒に対する関心が低く、ハウスの屋根の一部や扉の隙間が放置されるなど密閉が高く保たれていなかったことによるものと考えられる。以上の結果、ハウス内外の気温差は、連続晴天日が長く続き、ハウス密閉が高いほど拡大し、ハウス内気温は高温に維持されることが示唆された。

3.3 地温

太陽熱土壌消毒法の過去の研究事例では、青枯病菌の死滅条件として、日平均地温が40℃に達する日が10日以上連続する場合であることが示されている(孫工・野村, 1987)。さらに、陽熱還元消毒のように糖蜜やふすまを土壤中に混合させ還元処理を併用した場合は、死滅温度40℃に達する連続日数を3日まで短縮することができる(新村, 2003)。そこで、基準温度を40℃と設定し、各ハウスの日平均地温がこの基準温度に達した最大連続日数を集計した(Table 4)。これより、基準温度の達成日数は、同一年度であっても圃場ごとに異なり、また同一圃場であっても年度ごとに異なっていることが明らかになった。

A1ハウスは、2010年と2011年では深さ15cmまで基準温度の達成日数を超えていたが、消毒期間の日平均日射量の最も大きかった2012年の①ではより深い25cm層までその条件を満たしていた。また2012年に陽熱還元処理を行った②では、さらに深い35cm層までが青枯病菌の死滅条件を満たしていた。

A2ハウスは2011年と2012年のほぼ同時期に陽熱還元消毒を実施した。この消毒法では死滅日数が3日に短縮され、2011年では深さ5cm、2012年では深さ15cmまでの日平均地温がこの基準を満たしていた。

Bハウスは、2010年は深さ25cmまで、2011年は深さ50cmまで、日平均地温が基準温度を超過する日数が死滅日数の10日を超えたが、2012年はこの基準を満たすことがなく、消毒期間の日数が長いほどより深い層まで日平均地温が上昇する傾向がみられた。

DハウスとEハウスでは深さ15cm層まで基準温度に達する日があったが、死滅日数である10日は満たさなかった。とくにCハウスでは、全層にわたって基準温度に達することがなかった。この原因として、C、Dハウスでは前述したようにハウスの密閉状況が悪くハウス内気温が上昇しなかったこと、Eハウスでは消毒期間が18日間(Table 3)

と最も短かったこと等が考えられる。

3.4 陽熱還元消毒が地温と還元状態に与える影響

2012年のA1ハウスでは、太陽熱消毒区(A1①)と糖蜜処理した陽熱還元消毒区(A1②)の2試験区を設け、地温と酸化還元電位の変化を測定した。太陽熱消毒区と陽熱還元消毒区の日平均地温を比較したところ、最大差は1.5℃となり、顕著な差は見られなかった(Fig.2)。糖蜜の発酵熱による地温上昇が期待されたが、そのような効果は確認できなかった。

一方、Fig.3より酸化還元電位(Eh)は、両試験区ともに灌水後2日目に大きく減少したが、陽熱還元消毒区では負

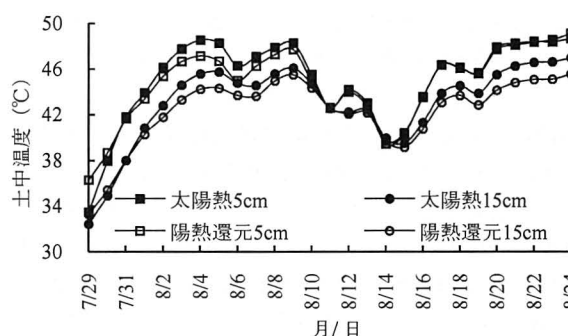


Fig.2 太陽熱消毒区と陽熱還元消毒区の日平均地温(A1/2012年)
Soil temperature of soil solarization and anaerobic soil disinfestations treatments of the glasshouse A1 in 2012

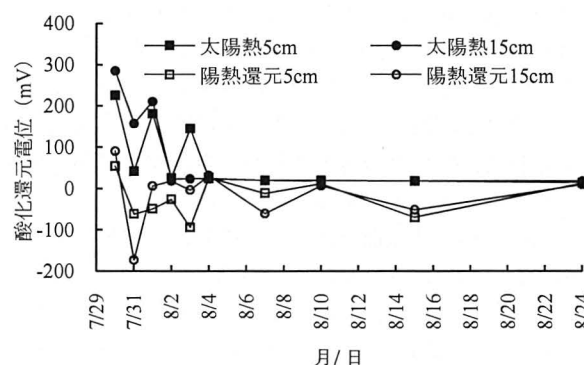


Fig.3 太陽熱消毒区と陽熱還元消毒区の酸化還元電位(A1/2012年)
Oxidation-reduction potential of soil solarization and anaerobic soil disinfestations treatments of glasshouse A1 in 2012

値を示しており、還元状態がより進行していることが明らかになった。さらに5日目からは両測定区とも安定した数値を示しているが、太陽熱消毒区では常に正值を示していた。一般に、青枯病を含む好気性細菌は Eh が負値をとるとその活性が大きく低下し、-100mV 以下で死滅するとされ(新村, 2000)、陽熱還元消毒区でより殺菌効果は高くなることが予想される。

3.5 土壌消毒の効果

土壌消毒前後の青枯病菌の生息密度を Table 5 に示す。単位は乾土 1g 当たりのコロニー形成数(cfu)で表している。青枯病菌の生息密度は、同一圃場であっても年度ごとに異なり、また、同一年度であっても圃場ごとに異なっていた。

A1 ハウスは、消毒前には2010年に青枯病菌が未発現で、2011年と2012年に深さ15cm層で検出されたが、消毒後には青枯病菌が全く検出されなかった。B ハウスは、消毒前には2010年は深さ15cm層に、2011年以降は深さ15cmと35cm層で青枯病菌が検出されたが、土壌消毒後は2012年の地点1を除き全層で検出されなかった。2012年の地点1の深さ15cmで検出されたのは、この地点の 日平均地温が

基準温度の40℃を連続して超える日数が9日間と死滅日数である10日を若干下回り地温の上昇が若干不十分であったことが一因として考えられる。しかし、Table 4 に示したように、A1ハウスの3ヵ年、及びBハウスの2010年と2011年の2ヵ年は、土壌消毒時に深さ15cmまでの日平均地温が基準温度40℃を死滅日数である10日間以上連続して超えており、その効果が現れた結果であると考えられる。

A2 ハウスでは基準温度40℃を超える日数が連続して10日を超えることはなかったが、消毒後の菌数は減少し消毒効果が確認できた。これは、2011年では深さ5cmまで、2012年は深さ15cmまでの日平均地温が陽熱還元消毒の死滅日数である3日を超えており、還元処理の効果が発現したことによるものと考えられる。C、D、Eハウスは土壌消毒前後ともに青枯病菌は検出され、いずれも土壌消毒の効果は小さく、逆に菌数が増加している土層や、より深層に分布域を移している現象もみられた。これら3ハウスは、基準温度に連続して達した日数が死滅日数の条件を満たしていなかった。

本地区のトマトは、消毒後の9月に定植され、翌年7月まで収穫の続く多段栽培である。例えば消毒効果の見られた2012年のA1及びA2ハウスにおいても、収穫後期にあたる6月以降に、A1ハウスで10%、A2ハウスで13%の株で青枯病が発生していた。これは、消毒効果の高かった地表面に比べ、深さ30cmまでの主根群域より深い層で菌体が残存し、それらが地表付近まで拡大したものと考えられる。よって、これらのハウスでは太陽熱土壌消毒は毎年行われている。

3.6 灌水量

土壌消毒時に灌水する目的は、土壌水分の増加で土壌を還元状態にするとともに、土壌の熱伝導率を増加させて太陽熱が土壌に伝わり易くすることにある。岐阜県の農業改良普及所では、太陽熱消毒の場合は圃場面を湛水状態にし、土壌面全体が見えなくなる程度まで灌水することを指導している。実際の調査では、農家がこの基準を参考にして農家自身の判断で灌水した水量を測定した。灌水は、マルチ被覆下に敷設した灌水チューブで行ったが、一部のハウスではハウス外溝からの越流を併用していた。

灌水状況の調査結果を Table 6 に示す。1回の灌水に要する日数は1~6日間とハウスによって大きく異なっていたが、大半のハウスの灌水回数は土壌消毒開始時の1回のみであった。太陽熱土壌消毒では表面をビニールマルチで被覆しているために土壌面からの蒸発による損失がほとんどなく、土壌水分量の測定記録から、下方への浸透によって土壌水分は若干減少するが、土壌消毒期間中、圃場容水量以上の土壌水分は確保していることを確認できたため、追加灌水の必要性は少ないと考えられた。例外的なケースとして2011年のBハウスでは、水分保持を目的として2回の灌水を行っていたが、深さ5cmの日平均地温は約5℃、深さ15cmで約3℃低下したが、4時間後にはほぼ灌水前と同程度まで日平均地温が回復していた。また、2012年のC

Table 5 青枯病菌の生息密度 (cfu/g乾土)

Population density of <i>Ralstonia solanacearum</i> (cfu/g dry soil)		調査年度	深さ (cm)	地点1		地点2	
圃場				消毒前	消毒後	消毒前	消毒後
A1	2010	15	0	0	0	0	0
		35	0	0	0	0	0
		50	0	0	0	0	0
	2011	15	4,078	0	0	0	0
		35	0	0	0	0	0
		50	0	0	0	0	0
	2012	15	3,769	0	3,446	0	0
		35	0	0	0	0	0
		50	0	0	0	0	0
A2	2011	15	16,178	0	0	0	0
		35	14,000	0	0	0	0
		50	10,442	1,024	8,366	1,024	0
	2012	15	21,270	1,101	9,168	2,919	0
		35	15,600	0	52,781	0	0
		50	18,524	2,967	22,624	0	0
	2010	15	14,118	0	12,941	0	0
		35	0	0	0	0	0
		50	0	0	0	0	0
B	2011	15	0	0	6,234	0	0
		35	0	0	4,078	0	0
		50	0	0	0	0	0
	2012	15	2,274	1,278	1,504	0	0
		35	1,617	0	0	0	0
		50	0	0	0	0	0
C	2012	15	2,593	0	1,587	2,083	0
		35	0	1,993	0	0	0
		50	0	1,571	0	0	0
D	2012	15	0	0	1,218	1,840	0
		35	0	0	0	0	0
		50	0	1,440	0	0	0
E	2012	15	7,722	7,384	5,600	2,157	0
		35	0	0	0	0	0
		50	0	0	0	0	0

注) A2ハウスと2012年のA1ハウスの地点2は陽熱還元消毒

Table 6 灌水量と飽和に必要な水量の比較
Comparison of the amount of irrigation water and water requirements for saturation

圃場	調査 年次	面積 (m ²)	灌水日	灌水量①		気相量*② (mm)	①/② (%)	対象土 層厚 (cm)
				(m ³)	(mm)			
A1	2010	2,780	7/27~8/1	667.7	240.2	86.6	277	0~70
	2011		8/1	432.5	155.6	150.0	104	0~70
	2012		7/29	570.8	205.3	125.9	163	0~70
A2	2011	2,041	7/13	444.9	218.0	115.8	188	0~70
	2012		7/13~7/15	504.0	247.0	133.1	186	0~70
B	2010	2,041	8/5~6	962.8	471.7	136.2	346	0~70
	2011		7/28, 7/31	1,010.8	495.2	174.0	285	0~70
	2012		8/4~6	366.6	179.6	136.6	132	0~100
C	2012	3,223	8/23~26, 8/30~31	2,340.6	726.2	93.9	773	0~100
D	2012	1,257	7/24~25	202.0	160.7	78.9	204	0~50
E	2012	1,571	7/18~19	356.2	226.7	87.0	261	0~70
全平均	—	—	—	—	302.4	119.8	265	—
平均**	—	—	—	—	291.3	134.9	218	—

注1) 気相量*: 各ハウスとも、2地点における平均値

注2) 平均**: 特に消毒効果の高かったA1, Bハウスの平均値

ハウスでは、土壌に残留する肥料成分をリーチングにより洗い流すことを目的として2回灌水し、多量(726.2mm)の水を使用した。

地温の上昇と土壌の還元状態を実現することを目的とした太陽熱消毒に必要な灌水量は、土壌間隙を飽和(飽和度100%)させるのに必要な水量が上限であると仮定することができ、その値は下方への浸透損失を無視すれば気相体積の合計に等しい。小玉ら(1984)によると、青枯病菌は土壌表面から1mの深さにも生息している。そのため、本調査では表層から深さ1mまでを土壌消毒の範囲としたが、すべてのハウスで1m以内(50~100cm)において地下水が確認された。そこで、表層から地下水位までを対象土層とし、各深さの気相率から飽和に必要な水量を計算した(Table 6, 気相量)。

灌水時期は作付けスケジュールなどの営農状況によって決定されるため、灌水開始時の土壌水分条件や地下水位はハウスによって大きく異なる。そのため、土壌間隙を飽和するのに必要な水分量の計算値は78.9~174.0mm(平均: 119.8mm)と大きく変動する。また、実際には地表面が湛水状態になるまで灌水を行っているが、営農作業上湛水状態になった直後に灌水を止めることが困難であるため、浸透損失が発生する場合が生じる。よって、土壌間隙の飽和に必要な水量より多くの灌水が行われ、その水量の実測値は155.6~726.2mmと大きく変動していた。この中でCハウスは最大値(726.2mm)となったが、これは前述したように太陽熱消毒に加え、リーチングを兼ねていたためである。さらにD及びEハウスでは地温の上昇が不十分で太陽熱土壌消毒の効果が得られなかった。そこで、十分な消毒効果が発現したA1, A2及びBハウスの灌水量について整理すると、太陽熱消毒のための栽培管理用水量(A1, B)として155.6~495.2mm(平均: 291.3mm)が使用され、その水量は間隙飽和に必要な水量の104~346%(平均: 218%)に相当していた。一方、陽熱還元消毒のための栽培管理用水量はA2ハウスの一圃場のみの結果であるが218~

247mm(平均: 232.5mm)で、間隙飽和に必要な水量の186~188%(平均: 187%)に相当した。

4. まとめ

以上の結果から、調査対象とした6ハウスのうち3ハウスで実施した太陽熱土壌消毒でトマト青枯病菌の十分な消毒効果を確認することができた。そこで、太陽熱土壌消毒の実施状況から栽培管理用水量の実態を整理すると以下のような知見が得られた。

- (1) 今回の調査では、2010~2012年の間に6ハウス(延べ11回)で土壌消毒が実施され、土壌消毒期間は18~33日間(平均24日)であった。その期間の気象条件にも大きく影響されるが、消毒期間が短い場合(例えば18日間)は十分な消毒効果が得られないことがあった。よって、気象条件が不安定な場合や、営農上消毒期間を長くとれない場合には後述の還元処理の併用が効果的であると考えられる。
- (2) ハウス内外の気温差は期間中の最大値で10℃以上(11.7~16.4℃)となるが、ハウスの密閉状況が十分でないときはハウス内気温の上昇も十分ではなく、土壌の消毒効果が低下した。
- (3) 太陽熱土壌消毒法の過去の研究事例によると、青枯病菌の死滅温度は日平均地温が40℃で連続して10日、還元処理を併用すると連続して3日とされているが、この条件を満たしたときに消毒後の菌数は著しく減少することを確認した。
- (4) 灌水は圃場面が湛水状態になるまでを目途に行われていたが、湛水状態に達するまでの浸透ロスや給水停止のタイミングから、土壌間隙を飽和するのに必要な水量より多量の灌水が行われた。本調査では十分な消毒効果が発現した太陽熱消毒のための栽培管理用水量として155.6~495.2mm(平均: 291.3mm)が使用され、その水量は土壌間隙を飽和にするのに必要な水量の

104~346% (平均: 218%) に相当していた。一方、陽熱還元消毒のための栽培管理用水量は 218~247mm (平均: 232.5mm) で、間隙飽和に必要な水量の 186~188% (平均: 187%) に相当した。

- (5) 土壌消毒用水は、栽培管理用水のなかでも多くの水量を要し、かつ消毒期間を確保するためには短期間で灌水する必要があるために時期的な水利用の集中が予想される。そのため畑地灌漑地帯では、土壌消毒を行うに当たって送・配水施設の組織容量による制約を受けることが危惧される。

謝辞: 本調査研究は農林水産省計画基礎諸元調査において行われたものである。快く調査に協力して頂いた各ハウスの農家の方々、毎回調査に同行していただいた東海農政局の職員と岐阜大学水利環境学研究室の皆様にご心より御礼申し上げます。

引用文献

- Abdallah, M.M.F. (1991): Control of different weed species at different soil depth with soil solarization, *Egypt J. Agron.*, Spec. Issue, 81-88.
- Al-Karaghoul, A.A. and Al-Kayssi, A.W. (2001): Influence of soil moisture content on soil solarization efficiency, *Renewable Energy*, **24**(1), 131-144.
- Al-Kayssi, A.W., Al-Karaghoul, A.A., Hasson, A.M. and Beker, S.A. (1990): Influence of soil moisture content on soil temperature and heat storage under greenhouse conditions, *J. Agr. Eng. Res.*, **45** (January-April), 241-252.
- 江種伸之, 加瀬広大, 山本秀一, 増田吉彦, 平田健正 (2008): 太陽熱を利用した農地消毒時の土中温度の変化特性, 土木学会論文誌 B, **64**(4), 267-279.
- Garofalakis, I., Tsiros, I., Frangoudakis, A., Chronopoulos, K. and Flouri, F. (2006): An Experimental study of soil temperature regimes associated with solar disinfestation techniques under greenhouse conditions in Greece, *J. Environ. Sci. Health, Part A*, **41**, 621-630.
- Horowitz, M., Reger, Y. and Herzlingar, G. (1983): Solarization for weed control, *J. Weed Sci.*, **31**, 170-179.
- JA にしみの(参照 2013.6.15): トマト, (オンライン), 入手先<<http://www.jan.or.jp/gallery/tomato.html>>
- Katan, J., Greenberger, A., Alon, H. and Grinstein, A. (1976): Solar heating by polyethylene mulching for the control of diseases caused by soil-borne pathogens, *Phytopathology*, **66**, 683-688.
- 小玉孝司, 福井俊男, 松本恭昌 (1980): 太陽熱とハウス密閉処理による土壌消毒法についてⅢ, 奈良農試研報, **11**, 41-52.
- 小玉孝司, 岡山健夫, 堀本圭一 (1984): 薬剤を併用した太陽熱土壌消毒と接木栽培によるトマト青枯病の防除, 関西病虫害研究会報, **26**, p.61.
- Martin, F.N. (2003): Development of alternative strategies for management of soilborne pathogens currently controlled with methyl bromide, *Annu. Rev. Phytopathol.*, **41**, 325-350.
- 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)」基準書・技術書, 179-185.
- 農林水産省農業研究センター (1982): 太陽熱利用による土壌消毒に関する実証的研究, 関東東山東海地域技術連絡会議.
- 城間理夫 (1971): 沖縄におけるビニールハウス微気象観測の 1 例一気温・地温一, 沖縄農業, **10**(1・2), 32-40.
- 新村昭憲 (2000): ネギ根腐萎凋病の病因と対策. 土壌伝染病談話会レポート, **20**, 133-143.
- 新村昭憲 (2003): 下層土還元消毒法の開発と各種土壌病害虫に対する防除効果, 第5回道南農業新技術発表会.
- 孫工弥寿雄, 野村良邦 (1987): 施設野菜病害の感染源制御 第4報・ナス青枯病被害残さ部位の第一次感染源能力と陽熱消毒の効果解析, 九州農業研究, **49**, p.122.
- [2014. 4. 14. 受稿, 2014. 11. 2. 閲読了]
[この研究論文に対する公開の質疑あるいは討議(4,000字以内, 農業農村工学会論文集企画・編集委員会あて)は, 2015年6月24日まで受付けます.]

Study on Irrigation Water Requirements for the Control of *Ralstonia solanacearum* via Soil Solarization in Managing Tomato Cultivation

DAI Yanyan*, KONDO Mio*, ITO Kengo**, YOSHIYAMA Kohei***,
ZHANG Pengfei*, ZHANG Fuping**** and SENGE Masateru**

* The United Graduate School of Agricultural Sciences, Gifu University, 1-1 Yanagido, Gifu 501-1193, JAPAN

** Faculty of Applied Biological Sciences, Gifu University, 1-1 Yanagido, Gifu 501-1193, JAPAN

*** River Basin Research Center, Gifu University, 1-1 Yanagido, Gifu 501-1193, JAPAN

**** Department of Geography, Shaanxi Normal University, Xi'an 710119, PR CHINA

Abstract

The amount of irrigation water, soil temperature and population density of a pathogenic bacterium *Ralstonia solanacearum* before and after soil solarization were investigated in 6 greenhouses (located at Kaizu city, Gifu, Japan) in order to obtain the basic information of water requirement for the control of *R. solanacearum* via soil solarization in managing tomato cultivation. Our results showed that the soil temperature was influenced by airtight state of a glasshouse, temperature differences between inside and outside of a greenhouse, and duration and climatic conditions of the solarization period. The density of *R. solanacearum* decreased markedly after soil solarization with daily average soil temperature greater than 40°C for consecutive 10 days or 3 days under anaerobic condition, which was consistent with previous studies. The amount of irrigation water ranged from 155.6 to 495.2 mm (average: 291.3 mm) for 2 greenhouses where soil solarization was effective, which corresponded to 104 - 346% (average: 218%) of the amount of water requirement from some state to become saturation state.

Key words : Soil solarization, Anaerobic soil disinfestation, Soil temperature, *Ralstonia solanacearum*, Irrigation water requirement in managing cultivation