

太陽熱を利用した土壤消毒に関する
基礎的研究
— 陽熱負荷モデルの構築と計測装置の開発 —

下高敏彰

2017

< 目次 >

第 1 章 緒言	1
1.1 本研究の背景	1
1.2 既存の研究成果と本研究の目的	3
1.3 論文の構成	5
第 2 章 太陽放射エネルギーと土壌面の熱収支	7
2.1 はじめに	7
2.2 材料と方法	7
2.3 実験結果と考察	11
2.3.1 太陽放射の分光特性	11
2.3.2 土壌における熱収支	16
2.4 まとめ	19
第 3 章 土壌の貯熱量を示す陽熱負荷量の近似モデルの構築	20
3.1 はじめに	20
3.2 地温計測実験	22
3.2.1 地温測定深度	22
3.2.2 各実験地における地温測定	25
3.2.2-(1)和歌山県農業総合試験場	25
3.2.2-(2)長崎県農林技術開発センター	25
3.2.2-(3)宮崎県総合農業試験場	26
3.2.2-(4)中央農業研究センター	27
3.2.3 観測地温の変化とそれに対する考察	30
3.3 陽熱負荷量の近似モデル	34

3.3.1	負荷基準温度の導入	34
3.3.2	陽熱負荷量の定義	36
3.3.3	日陽熱負荷量に対する推定や近似の精度に対する評価	36
3.3.4	日最高地温による日陽熱負荷量推定	37
3.3.5	日陽熱負荷量の近似モデルの構築	42
3.4	まとめ	49
第4章 陽熱負荷指数と土壌病原菌の消毒との関係		50
4.1	はじめに	50
4.2	材料および方法	50
4.2.1	そうか病の調査方法	50
4.2.2	トマト立枯病の調査方法	51
4.2.3	文献調査と熱負荷量との関係	52
4.3	実験結果と考察	53
4.3.1	日陽熱負荷量と馬鈴薯そうか病との関係	53
4.3.2	日陽熱負荷量とトマト立枯病との関係	56
4.3.3	日陽熱負荷量と各種病虫害との関係	59
4.4	まとめ	62
第5章 陽熱負荷指数を組み込んだ試作機の開発		63
5.1	はじめに	63
5.2	土壌病原菌の死滅条件の検討	64
5.3	地温測定深度の検討	65
5.4	試作機の構造	65
5.5	試作機の温度補正	71
5.6	各試験所における試作機を用いた地温測定方法	71

(1)鹿児島県農業開発総合センター熊毛支場	71
(2)鹿児島県農業開発総合センター金峰支場	72
(3)和歌山県農業試験場	72
5.7 実験結果と考察	73
5.7.1 試作機とおんどとりとの地温特性の比較	73
5.7.2 試作機による陽熱負荷	75
5.7.3 消毒完了の達成状況の検討	77
5.7.4 試作機における使用時の問題	77
5.8 まとめ	79
第6章 総括	81
謝辞	85
参考文献	87

第 1 章 緒言

1.1 本研究の背景

近年の農業技術の発展はめざましく、生産性向上や農作業の労力を軽減するために除草剤および化成肥料等が多く使用されてきた。しかし、これらの農業技術の発展に伴い、土壌中の生物性および理化学性に影響を与え続け、結果的に圃場を痩せた土壌に変化させ、土壌病原菌や害虫による被害を一層増加させた。

病虫害防除は、化学的防除、物理的防除、生物的防除および耕種的防除の 4 つに分類される。これらの中で、最も防除効果が安定し普及している方法は、化学的防除法であり、特に土壌病虫害防除のための化学農薬が広く普及され、安定した作物栽培を可能とした。しかし、化学農薬は、農耕地の環境および自然の生態系を破壊し、大きな影響を及ぼしたため問題となった。例えば、土壌の化学農薬の一つである臭化メチルが、オゾン層を破壊するとして、モントリオール議定書締約国会議でオゾン層破壊物質として指定され、2005 年 1 月以降から主要先進国で全廃となった。その後、臭化メチルの代替農薬として、クロルピクリン剤およびダゾメット剤等の土壌燻蒸剤が使用されてきたが、これらの代替農薬は、臭化メチルのように多くの種類の土壌病原菌や害虫に効果がなく、使用時においても容易に気化し、催眠を伴う強い刺激性のガスが人体に悪影響を与えるため、住宅密集地での使用は難しく、安全性および作業性の面でも問題を抱えていた。このような背景から、環境への負荷の軽減や食糧の安全安心を配慮した薬剤に頼らない病虫害防除法の確立が望まれ、物理的土壌消毒法が開発された。

物理的土壤消毒法には、太陽熱を利用した太陽熱土壤消毒法(Horowitz *et al*, 1983)、有機資材を土壤に施用した後に多量の水分を供給し土壤を還元状態にし、嫌気状態にすることで消毒する土壤還元消毒法(新村ら, 1999: 小山田ら, 2003: 久保ら, 2004)、高温の蒸気や熱水を土壤に散水することで消毒する蒸気・熱水消毒法(長井, 深津, 1970: 國安, 竹内, 1986: 竹内, 福田, 1993: 竹内, 川田, 2006)および地中に埋設したパイプに熱媒体を循環させ地中を加温し、さらにビニールフィルムで土壤表面を被覆し太陽熱で土壤を加温し消毒する地中加温・太陽熱併用処理法(中村ら, 2004)等が開発された。

これらの物理的土壤消毒法は共通して熱エネルギーを利用するため、化学的土壤消毒法であるクロルピクリン剤およびダゾメット剤等に比べて自然環境に影響を与えにくいことと、従来の化学的土壤消毒法で効果のなかった雑草種子の殺草効果およびウイルスの消毒にも効果があることで注目されている。

しかし、蒸気・熱水消毒法は、大量の水と熱エネルギーが必要になること、土壤還元消毒法は、大量の有機資材が必要になることで装置や燃料など経費の面で大きな負担となり、CO₂削減や省エネの面から一般的な普及には至っていない。

一方、太陽熱土壤消毒法は、他の消毒法に比べて簡便で低コストであるため広く普及しており、現在では、太陽熱土壤消毒法における消毒効果や養分供給効果の見える化、生物相への影響評価を組み入れた圃場管理技術の研究が進められ、さらなる技術革新の発展と普及拡大へと繋げようとしている。

1.2 既存の研究成果と本研究の目的

露地栽培やハウス栽培における土壌病虫害防除や雑草防除の物理的技術の一つである太陽熱土壌消毒法は、1976年頃から始まった(Katan, 1976)。太陽熱土壌消毒法は、夏季に含水率が60%になるように湛水処理(和歌山県農試編, 1985)を行い、土壌表面を透明マルチで被覆し、太陽エネルギーで地表面下10~30cmの地温を高め消毒する方法であり、土壌病害防除技術として利用された(白木, 1999; Abrham and Katan, 2012)。

近年、太陽熱土壌消毒に関する研究は、現場での実証と室内試験で多くの実験成果が報告されている(福井ら, 1981; 小玉, 福井, 1979a; 小玉ら, 1979b; 熊倉ら, 2005; 和歌山県農試編, 1985; 家村, 1986; 皆川ら, 1999; 荻森ら, 2007; 片山ら, 2003; 中村ら, 2004; 農林総合研究センター, 2008; 江種ら, 2008; 杉村, 阿万, 2001; 載ら, 2013)。

太陽熱土壌消毒法の効果は、これまでの土壌病害の研究者により恒温装置を用いた室内培養実験において、ある一定温度以上の処理時間で病原菌の死滅を判定しており(Robert and Richard, 1962; Yarwood, 1975; 小玉, 福井, 1979a; 小玉ら, 1979b; 福井ら, 1981; Pullman *et al*, 1981; Mihail, 1984; 中村ら, 2004; Maria *et al*, 2010)、露地実験においても地温が一定温度以上に達した経過時間の積算表示で示されている(C. J. Lopetz-Herrera *et al*, 1994; Porras *et al*, 2007)。

しかし、露地の場合では地温が天候条件により大きく左右され、土壌の物理性および地形の違い等により地温上昇度は大きく変化するため、消毒期間中における土壌中の貯熱量が大きく異なる。土壌

病原菌の数は、死滅温度域では減少し、死滅温度域以下であれば増殖を繰り返すと予想され、地温の経過時間では消毒効果を判定できない。このことにより、年次的に消毒効果の有無が明確化されないために、農家への普及技術と利用に関して一般的な普及に至っていないことが問題視されている。

これらの問題解決には太陽熱土壌消毒法の効果を熱量と時間の積算値で定量的に判定する必要がある、そのためには、土壌病原菌の死滅温度に達した熱量とその貯熱された時間の積算値をもって消毒判定できる指標を構築する必要がある。太陽熱土壌消毒法の効果を評価することで、消毒開始日および消毒期間の判定に用いることが可能となり、農家の栽培計画に大いに役立つと考えられる。

しかし、農家が実際に太陽熱土壌消毒法を用いた際の消毒完了を判定する方法は、現在開発されていない。測定した地温データから土壌病原菌の消毒完了の判定が可能であればよいが、地温データは、気象庁のアメダス観測点で測定されておらず、取得するための機器の費用や技術は、農家にとって大きな負担となる。また、地温データを取得したとしても、消毒完了を判定するためのデータ解析には、最低限の情報処理能力を有していなければならない。したがって、安価で、誰でも使用でき、消毒完了の判定ができる機能を組み込んだ地温データを取得し消毒の判定ができる装置の開発が求められている。

そこで、本研究は、太陽熱土壌消毒法における現場での消毒効果を判定する一つの手法として、土壌に蓄積された熱量を日最高地温から算出できる近似モデルを構築し、その熱量と土壌病原菌の消毒との関係について明確にすることを目的にした。さらに、太陽熱土

壤消毒判定装置の開発の初期段階として、市販化されているマイクロプロセッサの部品を用いて、太陽熱土壤消毒判定装置の試作機を製作し、測定精度やプロセスにおける再現性について検討した。

ここで、本研究の太陽熱土壤消毒法の特徴は、太陽熱土壤消毒法を実施する前に有機肥料や化成肥料を事前に投入してから透明マルチを被覆し消毒期間後に直接定植する方法である宮崎方式を実施し、さらに、地温上昇に伴って投入有機物の分解促進効果による省肥料化と土壤細菌の死滅効果による省農薬化の2点を重視したものである。

1.3 論文の構成

上記の研究目的を明らかにするために、下記の論文構成とした。

第1章では、本研究の背景や既存の研究成果および研究目的を記述した。

第2章では、太陽熱土壤消毒法の熱源である太陽エネルギーのスペクトル分布について説明し、地表面の熱収支から、太陽熱土壤消毒法における地温変化に及ぼす要因を示し、消毒効果を示すためのモデル構築に必要な要素を検討した。

第3章では、現場における太陽熱土壤消毒法の消毒効果を示す一つの手法として、日最高地温から土壤に蓄積された熱量を算出できる近似モデルの構築を試みた。

第4章では、馬鈴薯そうか病菌およびトマト立枯病菌の死滅と土壤に蓄積された熱量との関係について明らかにし、過去の論文等から各種土壤病原菌の死滅温度と時間との関係について整理した。

第5章では、第3章で構築したモデルの概念を組み込んだ太陽熱

土壤消毒判定装置の試作機を開発し、開発した装置の動作および温度特性等を検討し消毒の判定に使用できるか評価した。

第6章では、太陽熱土壤消毒法の消毒効果のモデル化に関する総括を行うとともに、将来の展望と今後の技術開発について記述した。

第 2 章 太陽放射エネルギーと土壌面の熱収支

2.1 はじめに

太陽熱土壌消毒法の熱源である太陽光源の特性を明らかにするために、太陽熱土壌消毒期間にあたる夏季の長崎県長崎市における太陽放射エネルギーの測定を実施し、スペクトル分布を検討した。

また、太陽放射エネルギーと土壌面の熱収支から、太陽熱土壌消毒法における地温上昇に及ぼす条件を検討し、土壌に蓄積される熱量を示すモデルを構築するために必要な地温測定条件を検討した。

2.2 材料と方法

実験場所は、北緯 32.7585°、東経 129.9444°に位置する長崎総合科学大学シーサイドキャンパスの 2 階エントランスであった。ここは、東側には橘湾があり、西側には旧長崎街道の難所日見峠を要す高さ 200 メートル前後の山に囲まれている。試験日は、2013 年 9 月 10 日の晴天日である。測定は、日出後の 6 時から、日没前の 17 時 47 分の 11 時間 47 分間で実施した。

太陽放射エネルギーを測定するために、分光スペクトル測定装置であるフィールド携帯型分光放射計 FieldSpec3(ASD Inc 社製)(写真 1)を使用した。この測定装置は、分光スペクトルを 350 nm~2500 nm の範囲を 1nm の波長分解能で測定可能である。測定風景を写真 2.1~2.3 に示す。

太陽放射の成分は、直達放射と散乱放射に分けられ、各種放射の測定方法は、太陽放射が、測定装置の受光部を露出させた状態で 1 分間の測定を実施し、散乱放射が、太陽放射の測定後に受光部に影

を作り、1 分間の測定を実施し、取得した。両測定ともに測定時に校正として白色版の測定も実施した。測定は、20 分間隔の合計 36 回で実施された。直達放射は、下記の(2.1)式から算出した。

$$\text{直達放射} = \text{太陽放射} - \text{散乱放射} \cdot \cdot \cdot \cdot (2.1)$$



写真 2.1 フィールド携帯型分光放射計 FieldSpec3



写真 2.2 太陽放射測定の様子



写真 2.3 散乱放射測定の様子

2.3 実験結果と考察

2.3.1 太陽放射の分光特性

測定した長崎県東長崎地区の1時間毎の太陽放射、直達放射および散乱放射エネルギースペクトル分布の経時変化をそれぞれ図 2.1～2.3 に示す。各放射エネルギースペクトル分布は、近赤外域の700～780nm、800nm、950nm、1150nm および 1350～1450nm の5バンドの領域で極端なエネルギー減衰を確認した。一般に地表面での太陽放射エネルギーは、近赤外域である700nm、800nm、900nm、1100nm および 1400nm 付近で水蒸気による減衰が現れることが報告されている(日本リモートセンシング研究会編, 2003)。したがって、本実験における特定波長帯の減衰は、大気中の水蒸気によって吸収されるものと推測される。直達放射と散乱放射エネルギースペクトル分布の傾向についても太陽放射と同じ波長帯で減衰が確認された。本実験で得たスペクトル分布は、一般的なスペクトル分布の傾向に類似していた。次に、太陽熱土壌消毒法における地温上昇に影響を与える因子および関連する波長帯を調べるために、可視光領域と近赤外領域におけるエネルギースペクトル分布の経時変化を調査した。

太陽放射、直達放射および散乱放射における可視光領域である450nm、550nm および 660nm と近赤外領域である850nm のエネルギースペクトル分布の経時変化をそれぞれ図 2.4～2.5 に示す。また、各放射エネルギー量の経時変化を図 2.6 に示す。各波長帯におけるエネルギースペクトル分布の経時変化の結果から、直達放射エネルギー分布は各波長帯においても南中時付近を頂点に対称となることが確認された。一方、散乱放射エネルギー分布は、時間経過とともに

に上昇傾向を示した。I.A.Shugin(1973)は、大気中での太陽放射の吸収および散乱は、大気の光学的性質と大気質量の変化に関係していると報告している。また、地表面での太陽放射スペクトルは、大気中を伝播する際、大気中の微小粒子や水蒸気によりレーリー散乱やミレー散乱を受けることが知られている(日本リモートセンシング研究会編,2003)。この散乱放射エネルギー量が時間経過とともに上昇傾向を示したのは、外気温の上昇に伴い地表面の潜熱量が高まることで水蒸気量が多くなり、直達放射の散乱量も多くなったことが要因であると推察される。

各放射エネルギー量の経時変化の結果から、散乱放射エネルギー量は、直達放射エネルギー量に比べて低いため、太陽熱土壌消毒における地温上昇に及ぼす影響がほぼないものと推察される。各波長帯におけるエネルギー量の傾向は、850nm よりも 450nm の方で高く、長い波長帯から短い波長帯の順にエネルギー量が高いことが確認された。南中時のエネルギー量は、太陽放射が 830W/m²、直達放射が 797 W/m² および散乱放射が 33W/m² であり、この時の直達光比率は 96% で、極めて高い値であった。日単位での直達光比率は、内嶋ら(1981)の結果によると晴天日において 85% 前後であると報告されており、本実験においては、内嶋らの報告より高い比率が得られた。太陽放射における直達放射と散乱放射エネルギー量の差は、約 24 倍であった。これらの結果から、太陽熱土壌消毒法の熱源である太陽放射エネルギーの享受は、散乱放射エネルギーよりは直達放射エネルギーの方で大きく影響していることが示唆された。また、地表面のエネルギーの享受は、長い波長帯よりもエネルギー密度が高い短い波長帯のほうで大きく影響していることが推察された。

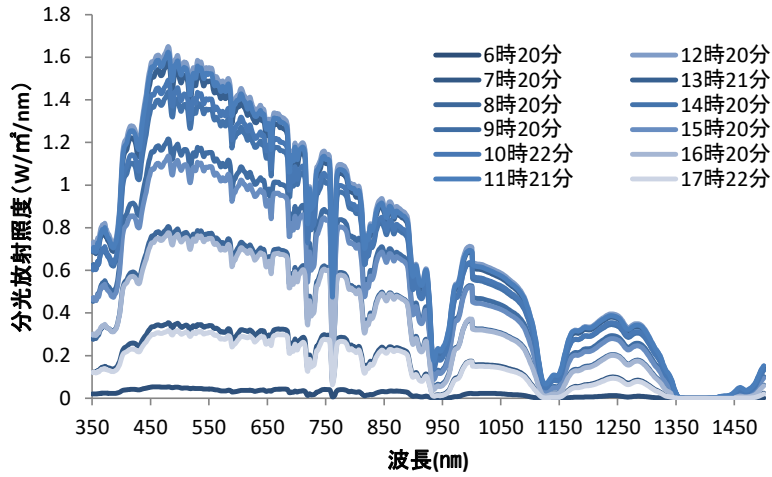


図 2.1 太陽放射エネルギーの分光反射特性の経時変化

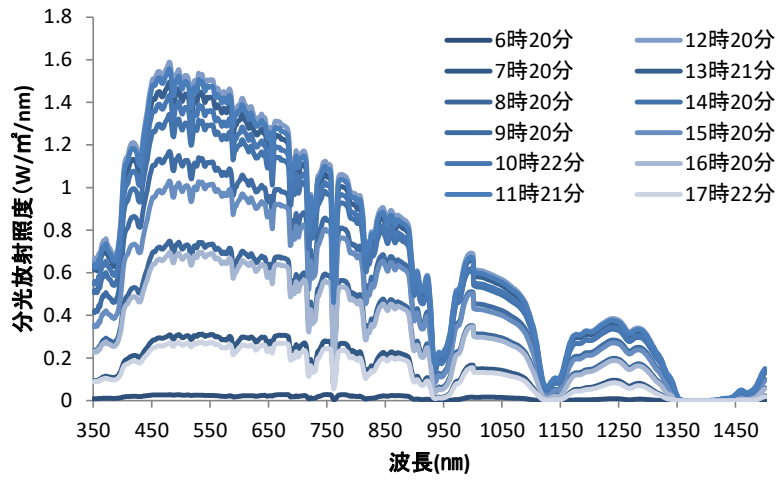


図 2.2 直達放射エネルギーの分光反射特性の経時変化

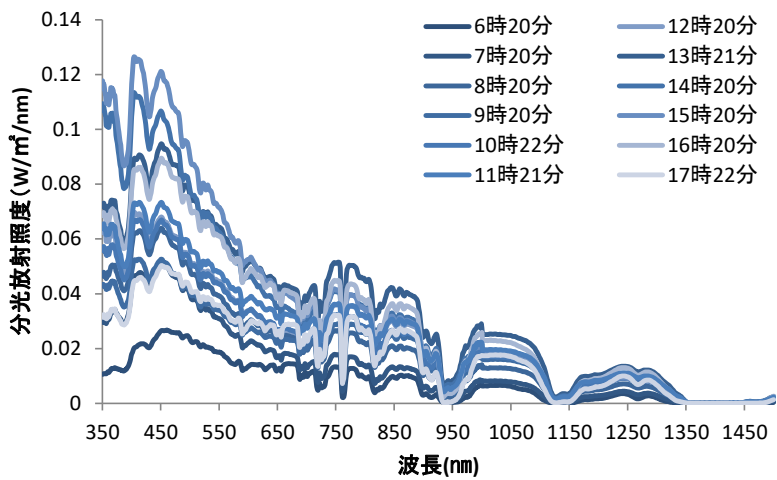


図 2.3 散乱放射エネルギーの分光反射特性の経時変化

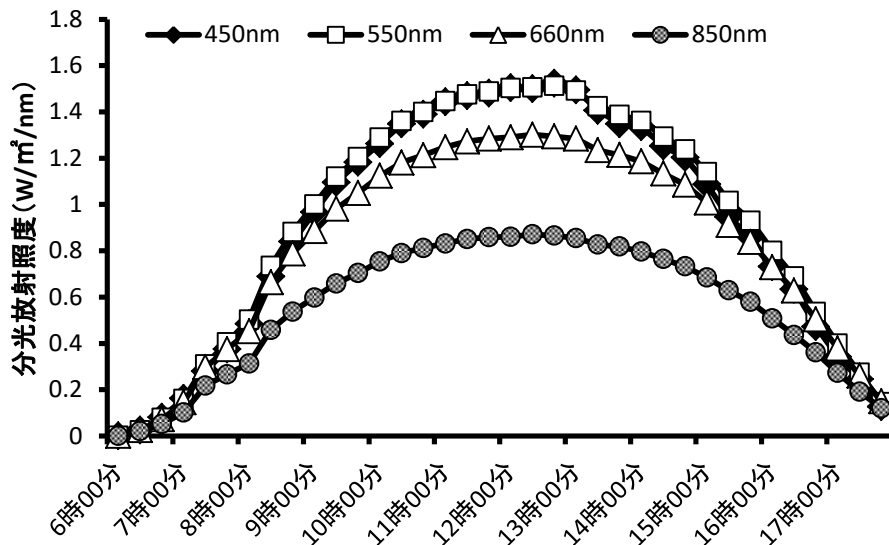


図 2.4 直達放射エネルギーにおける可視光領域である 450nm、550nm および 660nm と近赤外領域である 850nm のエネルギースペクトル分布の経時変化

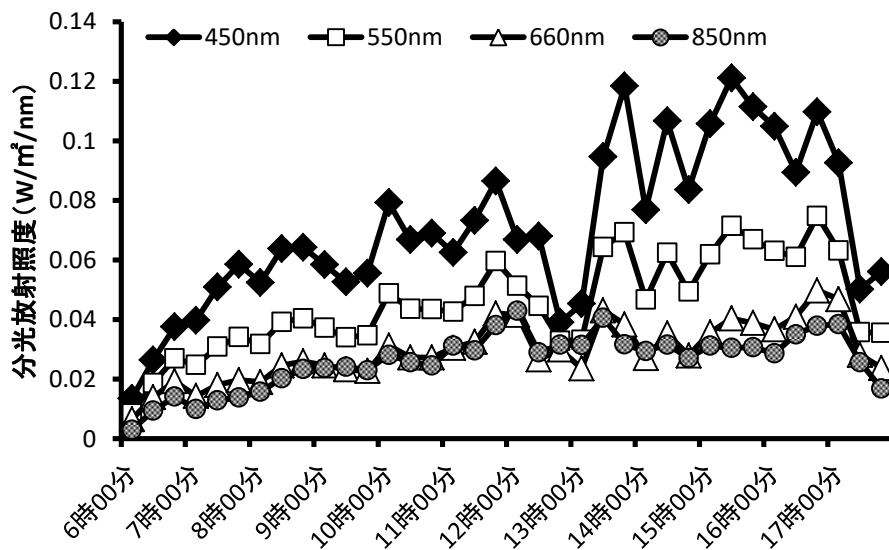


図 2.5 散乱放射エネルギーにおける可視光領域である 450nm、550nm および 660nm と近赤外領域である 850nm のエネルギースペクトル分布の経時変化

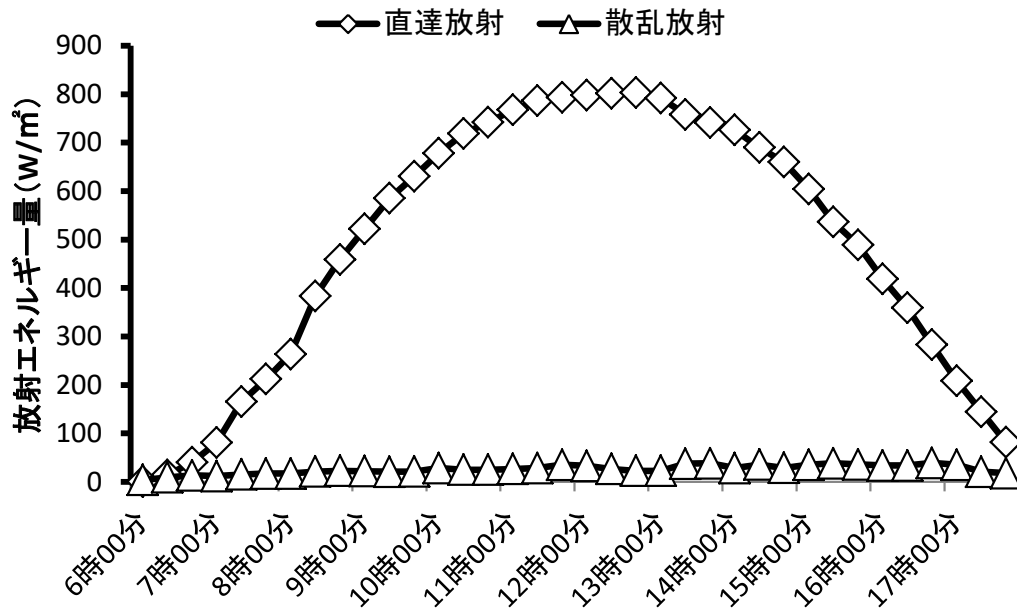


図 2.6 各放射エネルギーの経時変化

2.3.2 土壌における熱収支

長崎県東長崎地区における太陽放射の測定結果から、地温上昇に及ぼす熱源として太陽放射の成分の中で直達放射が大きく影響していることが示唆された。また、短い波長帯がより地温上昇に影響を及ぼすことが推察された。太陽熱土壌消毒において高い地温を確保することは、最も重要なことである。そこで、地温上昇に影響のある直達放射以外に、太陽熱土壌消毒における地温上昇に影響のある条件を地表面の熱収支から考察した。

地表面における熱収支の概略図を図 2.7 に示す。地表面の熱収支は下記の式(2.2)に示す。

$$Rn = H + LE + G \cdot \cdot \cdot (2.2)$$

ここで、 Rn は太陽からの純放射量、 H は地表面が大気を暖めるのに消費される顕熱、 LE は土壌面蒸発により水の蒸発潜熱として消費される熱量、 G は地表面から土壌中へ向かって熱が移動することによって土の内部を暖めるのに消費される熱伝導量である。

熱収支式によれば、地表面の熱収支は、太陽からの純放射量(Rn)が地表面においてどのように分配されているかを表現するものであり、地温は、地表面と外界の間に生じる熱の授受と、それを地中に伝える土壌内部の物理的条件によって決定され、太陽から直達放射、散乱放射や大気からの熱放射を受けると同時に、地面に反射され、また、放射、対流や蒸発によって熱を失いながら、その収支余剰熱量が地面中に伝え、地温を高めている(養賢堂, 1979)。

太陽熱土壌消毒法における熱の授受は、太陽放射エネルギーから享受した熱を密閉ハウスや透明マルチ等で地表面を被覆することで、潜熱による熱損失を少なくし地温を高めている。したがって、太陽

熱土壌消毒法の地温の上昇に影響を及ぼす要因としては、土壌内部の物理的条件、密閉ハウスや透明マルチなどの潜熱による熱損失を低減する条件であることが示唆された。

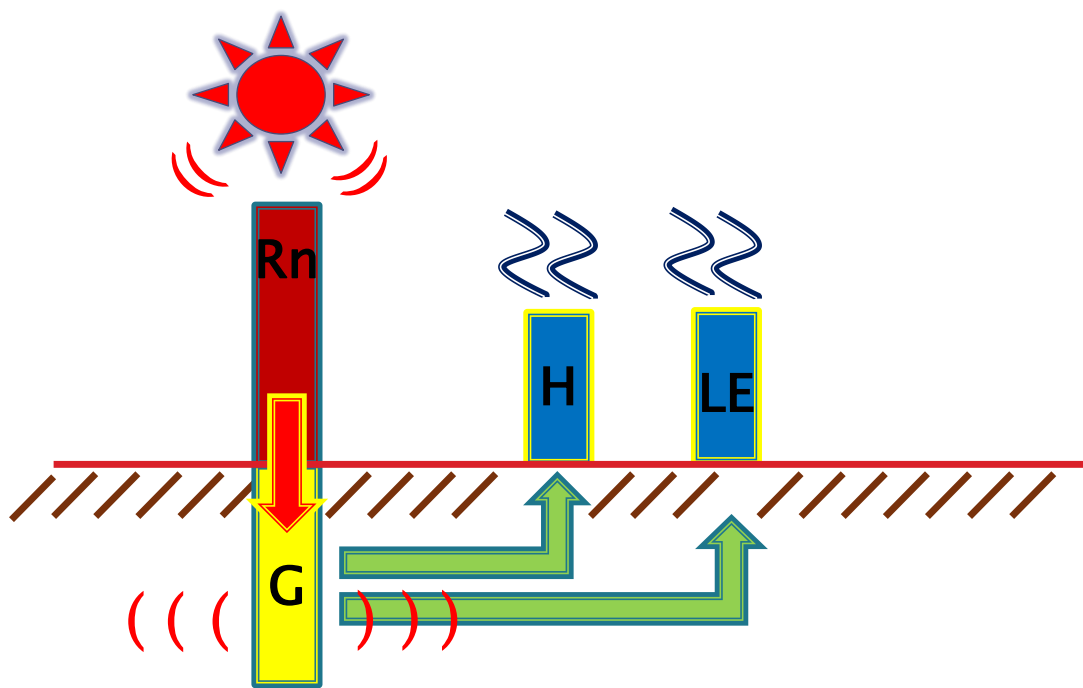


図 2.7 地表面における熱収支の概略図

2.4 まとめ

本研究は、長崎県東長崎地区において、夏季の晴天日における太陽放射、直達放射および散乱放射のエネルギーの分布について経時的に測定を実施した。また、土壌の熱収支式から太陽熱土壌消毒法における地温上昇に及ぼす条件を検討し、以下の結果が得られた。

地温上昇に及ぼす熱源である太陽放射の成分で直達放射が散乱放射よりも大きく影響していることが示唆された。

また、各波長帯におけるエネルギー密度は、短い波長帯の方が長い波長帯よりも高いことが示唆され、地温上昇に影響を及ぼすことが推察された。

太陽熱土壌消毒法の地温の上昇に影響を及ぼす要因としては、土壌内部の物理的条件の他に、密閉ハウスや透明マルチなどの潜熱による熱損失を低減する条件であることが示唆された。

以上の結果により、次章で構築する太陽熱土壌消毒法における土壌中に蓄積された熱量を示すモデルの構築には、透明マルチや密閉ハウスなどの地温の収支余剰熱量を保持または高める条件を考慮する必要があることが明らかとなった。

第 3 章 土 壌 の 貯 熱 量 を 示 す 陽 熱 負 荷 量 の 近 似 モ デ ル の 構 築

3.1 はじめに

第 2 章において、太陽熱土壌消毒法の熱源は、主に直達放射エネルギーが関係していることを示した。また、地表面の熱収支の関係から、地温の温度変化は、土壌の物理特性の影響が大きく、太陽熱土壌消毒法においては、土壌の物理特性に加え、密閉ハウスや地表面を覆う透明マルチの有無による潜熱の熱損失の影響を受けることを示した。これを受けて本章では太陽熱消毒法への適用を目的として、土壌中に蓄積される熱負荷量を推し量る近似モデルを構築する。

土壌病原菌の消毒効果に関しては、大きく分けて、以下の二つの環境における先行研究が報告されている。

- ① 実験室内の恒温装置内に土壌病原菌を入れて、恒温装置内の処理温度とその経過時間の積算によって病原菌の死滅条件を明らかにした(愛知県, 2010: 橋本ら, 1980: 家村, 1986: 石松ら, 2013: 伊達ら, 1989: 片山ら, 2003: 越智ら, 2015: 小玉ら, 1979: 小玉ら, 1982: 久保ら, 2004: 國安ら, 1986: 松尾ら, 2014: 永尾ら, 2015: 西, 2014: 小山田ら, 2003: 坂口ら, 1982: 塩見ら, 1989: 清水ら, 1983: 清水ら, 1985: 鈴木ら, 1983: 高見ら, 2015: 谷名ら, 2009: 山崎ら, 2012-3)。
- ② 対象病原菌を圃場の土壌中に埋没させ、特定の地温以上の経過時間の積算で消毒効果を示した(小玉,福井, 1979a: 小玉ら, 1979b)。

これらの先行研究は、残念ながら以下に示す理由で、実際の農地を対象とした太陽熱土壌消毒法には直接適用できない。先行研究①では土壌病原菌の死滅条件を示しているが、太陽熱消毒法の適用現

場である実際の農地においては、適切な処理温度の恒温状況を保持できないので、その結果をそのまま適用することはできない。また先行研究②では、実際の圃場での研究成果ではあるが、特定温度以上の経過時間に注目しており、その温度以上での温度変化を考慮していないので、同じ経過時間であっても温度変化の状況によって消毒効果に違いが現れることもある。そのため、土壌病原菌の消毒効果は、現場の農業従事者の判断に委ねられることになり、太陽熱土壌消毒法の普及と利用はあまり進んでいない。

したがって、太陽熱土壌消毒法のさらなる普及には、土壌病原菌の消毒効果を土壌中の熱負荷量を用いて定量的に判断できる指標が必要になる。このような指標があれば、農業従事者は太陽熱消毒法の適正時期や消毒期間の推定が可能となり、作物の栽培計画に大いに役立つと考えられる。

また陽熱負荷量に関して、高倉(1998)は、プラスチックハウスとマルチの2層式太陽熱利用土壌消毒システムに関するシミュレーションモデルを開発し、「デグリアワー」という概念が太陽熱土壌消毒法の消毒効果の指標として有効であると言及している。「デグリアワー」とは、環境温度と継続する時間の積で表され、土壌中の熱負荷量に対応する概念である。また、内嶋(2011)は、乳牛の好適温度域上限(20℃)と年変化曲線とに囲まれた面積部が、温暖化の進行につれ増加していることを見出し、この関係がその日の最高気温のべき関数で表現できることを示した。そして、乳牛が温度から受けるストレスを検討する段階で、日最高気温を用いた暑熱ストレスデグリアワーの指標を提案している。

本章では、内嶋(2011)が提案した乳牛の暑熱ストレスデグリアワ

一のモデル式を参考に、土壌中の温熱環境を測る尺度として陽熱負荷量を定義し、日毎の日最高地温から陽熱負荷量の推定式を作成し、近似モデルを構築する。ここで、参考文献の(46: 下高ら)においては、陽熱負荷量を土壌環境の違いを考慮せずに考察していたが、本研究では、土壌環境の違いを表すパラメータを持つ近似モデルを構築する。また、本研究において消毒の対象とする土壌病原菌は、エンドウ苗立枯病菌、馬鈴薯そうか病菌とトマト立枯病菌の3種類とする。

3.2 地温計測実験

本研究における地温計測実験は、以下の4地点で実施した。

- (1) 和歌山県農業試験場(和歌山県紀の川市)
- (2) 長崎県農林技術開発センター(長崎県雲仙市)
- (3) 宮崎県総合農業試験場(宮崎県宮崎市)
- (4) 中央農業研究センター(茨城県つくば市)

それぞれの実験地では、作物の産地化政策によって、対象となる土壌病原菌や施肥される有機物資材が異なり、土壌環境は異なることに注意する。

3.2.1 地温測定深度

主な土壌病原菌の生息深度を表 3.1 に示す。前述のように本研究で対象とする土壌病原菌は、表 3.1 の上の3行にある馬鈴薯そうか病菌 (*Streptomyces acidiscabies*)、トマト立枯病菌 (*Fusarium striatum*) とエンドウ苗立枯病菌 (*Fusarium oxysporum*) である。これらの生息深度は最大で 30cm なので、地温測定深度は 5cm、15cm、

30cm の 3 点の中から、実験地の対象病原菌に応じて選択する。各実験地における対象病原菌や測定深度は次の 3.2.2 節で記述する。

表 3.1 土壤病原菌の土壤中での生息深度

(木村, (1991), 51 の一部抜粋)

病原菌	生息適域(cm)
<i>Streptomyces acidiscabies</i>	0~30
<i>Fusarium striatum</i>	0~25
<i>Fusarium oxysporum</i>	0~25
<i>Corticium rolfsii</i>	0~5
<i>Phytophthora capsici</i>	0~5
<i>Plasmodiophora brassicae</i>	0~5
<i>Pythium aphanidermatum</i>	0~10
<i>Rhizoctonia solani</i>	0~15
<i>Verticillium dahliae</i>	0~25
<i>Erwinia aroideae</i>	0~25
<i>Pseudomonas solanacearum</i>	0~30
<i>Helicobasidium mompa</i>	10~40
<i>Rosellinia necatrix</i>	10~45

3.2.2 各実験地における地温測定

太陽熱土壌消毒法後の施肥耕起に伴う消毒土壌の攪乱・再汚染のリスクをさけるため、消毒前に施肥を行う「宮崎型改良陽熱消毒法」(白木,1999)を参考に、消毒前に有機物施肥・耕起を行った。

3.2.2-(1)和歌山県農業総合試験場

和歌山県の地温測定は、和歌山県農業総合試験場場内と現地農家圃場の2ヶ所の密閉ハウス内マルチ被覆圃場において太陽熱土壌消毒法を実施した。処理試験区の概要を表3.2に示す。和歌山県農業総合試験場の試験区は、消毒前に各有機資材を施肥する牛糞オガクズ堆肥+ポストハイパーCDU(微生物分解性肥効調整型肥料;有機質資材50%)区と消毒後に化成肥料を施肥する慣行区である。対象作物は実エンドウ”きしゅううすい”である。地温測定は温度データロガー(おんどとり:RTR-502、T&D)を用いて、深さ5cm、15cmおよび30cmの3点を10分間隔で測定した。対象病原菌はエンドウ苗立枯病菌である。太陽熱土壌消毒期間は2014年8月8日から9月3日の27日間であった。

3.2.2-(2)長崎県農林技術開発センター

長崎県の地温測定は、長崎県雲仙市愛野町に位置する長崎県農林技術開発センター馬鈴薯研究室の圃場である。土壌は火山灰を含んだ安山岩埴壤土(細粒黄色土)で、そうか病多発の土壌である。雲仙山麓畑作地帯の一部であり、二期作の馬鈴薯栽培が盛んな地域である。処理試験区の概要を表3.3に示す。長崎県農林技術開発センターの試験区は、畝の形状が異なり、平張り畝と畝立ての二種類で透

明マルチを被覆し太陽熱土壤消毒法を実施した。対照である無処理区は、畝の形状を平張りとし、透明マルチを被覆せず太陽熱土壤消毒を実施しない区である。各試験区の地温測定は、平張り区および畝立て区ともに表面に全面被覆した透明マルチの表面下 5cm と 15cm に温度記録計を設置し、無処理区においても表面下 5cm と 15cm に温度記録計を設置した。対象病原菌は馬鈴薯そうか病菌である。太陽熱土壤消毒期間は、秋植え馬鈴薯前にそうか病防止として梅雨明け後の盛夏期の 2014 年 7 月 23 日から 9 月 12 日の 52 日間である。地温は温度記録計(おんどとり：TR-71wf、T&D)を使用し、30 分間隔で記録した。

3.2.2-(3)宮崎県総合農業試験場

宮崎県の地温測定は、宮崎県宮崎市佐土原町に位置する宮崎県総合農業試験場のハウス圃場で実施した。太陽熱土壤消毒法の方法は、ハウス栽培終了後に後片付けと耕耘を行った後、土壌分析に基づき基肥施用を行った後、散水して透明マルチを被覆し、ビニールハウスを密閉して太陽熱土壤消毒法を開始した。各試験区の概要を表 3.4 に示す。試験区は計 8 試験区あり、施肥資材として使用した焼酎粕濃縮液チューブ処理は、宮崎県特産のサツマイモ焼酎粕残渣を利用したものである。地温は深さ 15cm に温度記録計(おんどとり：RTR-502、T&D)を埋設して、30 分間隔で測定した。試験区 O の地温データは、温度記録計の不良により欠測したので、試験区 O を除いた試験区について地温の解析を行った。対象病原菌はトマト立枯病菌である。太陽熱土壤消毒期間は、2013 年 7 月 26 日から 8 月 26 日の 32 日間であった。

3.2.2-(4)中央農業研究センター

茨城県の地温測定は、茨城県つくば市に位置する中央農業総合研究センター観音台圃場のビニールハウス2棟(E1、E2)を用いて実施した。ビニールハウス圃場の土性は表層腐植質黒ボク土である。

処理試験区の概要を表3.5に示す。試験区は3試験区を設け、試験区1では、有機質肥料(有機アグレット666、朝日工業、東京)を140kg/10a施肥後、ポリエチレンフィルム(厚さ0.02mm、セキスイフィウム株式会社、大阪)で被覆し、太陽熱土壌消毒法を行った。試験区2では、焼酎粕濃縮液(アミノハッピー、雲海酒造、宮崎)を1t/10a施肥後、同様にポリエチレンフィルムで被覆して太陽熱土壌消毒法を行った。試験区3では、前述の有機質肥料を140kg/10a施用したが、ポリエチレンフィルムによる被覆は行わなかった。試験区は1株当たり6区画(5m²/区)、2反復で配置した。太陽熱土壌消毒は2014年7月29日にポリエチレンフィルム被覆と同時に灌水チューブを敷設し、ハウスを締め切り、約3時間灌水した。太陽熱土壌消毒期間は2014年7月29日から2014年9月2日までの36日間であった。処理中の地温は、各試験区の深さ5cmおよび15cmについてデータロガー(おんどとり:TR-52i、T&D)を用いて測定した。対象病原菌はトマト立枯病菌であった。

また、同試験を2015年9月4日から2015年10月16日までの41日間にも実施した。

表 3.2 和歌山県農業試験場と現地農家の試験処理区

地域・試験区		施用資材	被覆	施肥時期
農試	慣行区	硫安, PK40号	有り	陽熱消毒後
	牛オガ+H-CDU	牛ふんオガクズ堆肥, ポストハイパーCDU	有り	陽熱消毒前
ハウス 南部町	慣行区	硫安, PK40号	有り	陽熱消毒後
	牛オガ+H-CDU	牛ふんオガクズ堆肥, ポストハイパーCDU	有り	陽熱消毒前
印南町	慣行区	硫安, PK40号	有り	陽熱消毒後
	牛オガ+H-CDU	牛ふんオガクズ堆肥, ポストハイパーCDU	有り	陽熱消毒前

表 3.3 長崎県農林技術開発センター馬鈴薯研究室圃場の
試験処理区

	処理方法	施用資材	被覆	施肥時期
露地	畝立て	粒王7号(動物質有機肥料)	有り	陽熱消毒前
	平張り	馬鈴薯特号(化学肥料)	有り	陽熱消毒前
	平張り	ソイルサブリペレット(植物質)	無し	植付け前

表 3.4 宮崎県総合農業試験場の

密閉ハウス圃場における試験処理区

試験区	施用資材	被覆	施肥時期
I	焼酎粕濃縮液チューブ処理	有り	陽熱消毒前
J	有機肥料(市販)	有り	陽熱消毒前
K	高温耐性+硝化細菌+焼酎粕濃縮液チューブ処理	有り	陽熱消毒前
L	高温耐性+硝化細菌+有機肥料(市販)	有り	陽熱消毒前
O	有機肥料(市販)	有り	陽熱消毒後
P	焼酎粕濃縮液チューブ処理	有り	陽熱消毒後
M	有機肥料(市販)	無し	陽熱消毒なし
N	焼酎粕濃縮液チューブ処理	無し	陽熱消毒なし

表 3.5 中央農業総合研究センターの

密閉ハウス圃場における試験処理区

試験区	2014年		2015年		
	施用資材	被覆	施用資材	被覆	
ビニールハウス(E1)	E1-1	有機アグレット666	有り	有機アグレット666	有り
	E1-2	焼酎粕濃縮液 アミノハッピー	有り	焼酎粕濃縮液 アミノハッピー	有り
	E1-3	有機アグレット666	無し	有機アグレット666	無し
ビニールハウス(E2)	E2-1	有機アグレット666	有り	有機アグレット666	有り
	E2-2	焼酎粕濃縮液 アミノハッピー	有り	焼酎粕濃縮液 アミノハッピー	有り
	E2-3	有機アグレット666	無し	有機アグレット666	無し
処理期間	7月29日～9月2日		9月4日～10月16日		

3.2.3 観測地温の変化とそれに対する考察

和歌山県農業試験場のある日の測定深度および有機資材の施肥の有無による地温の日変化を図 3.1 に示す。地温の日変化は深度が深くなるにつれてその温度差が少なくなる傾向にあり、深度 5cm の地温は地表や気温の影響を受けて 15 時頃に最大になるのに対し、深度 15cm では 17 時頃、深度 30cm では 19 時頃であった。このような深度による地温変化は、土壌の熱伝導に関係し、深度が深くなれば温まりにくく冷めにくい傾向にあることがわかる。

また、有機資材の施肥の有無による土壌環境の違いも地温の温度変化に影響していることも図 3.1 からわかる。一般的に有機資材の施肥をした方が施肥しなかった時よりも地温が高い傾向にあり、深度が深いところでは、最高地温に達する時刻が 1 時間程度遅れる傾向にある。これらの傾向の違いは、土壌中の微生物による有機物の分解熱の影響と考えることができる。

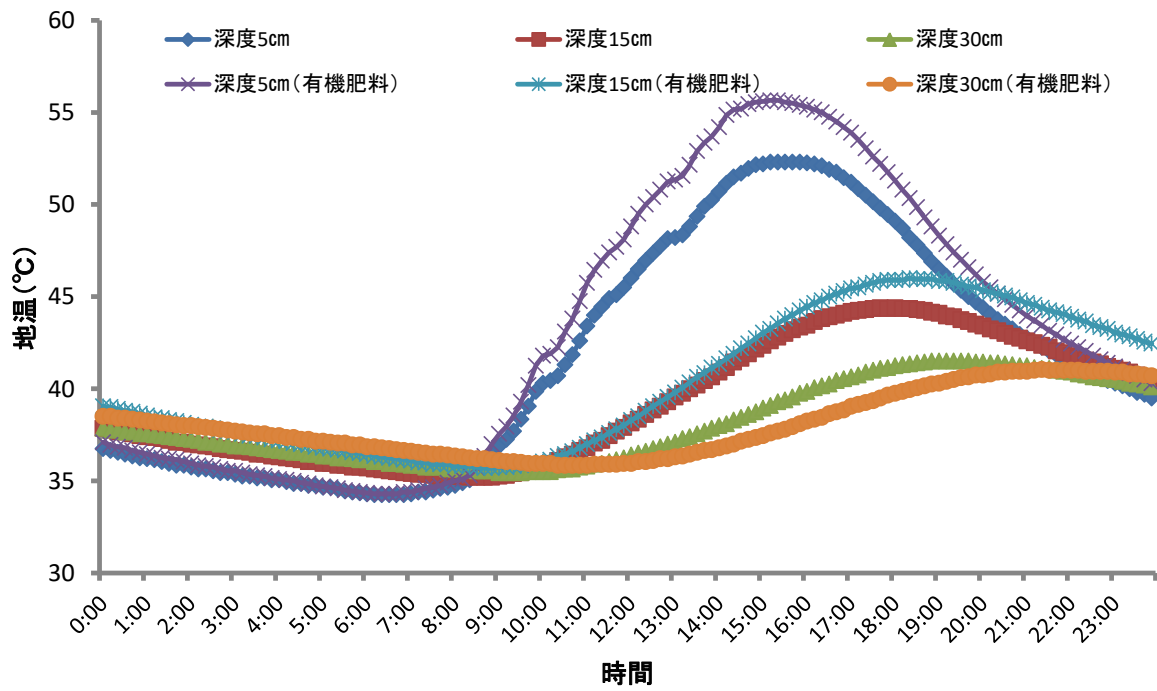


図 3.1 深さ別および有機肥料施用の有無による
地温の日変化
(和歌山県農業総合試験場)

次に、畝などの地表面の形状による地温変化の違いを見るために、長崎県農林開発センター馬鈴薯研究所におけるある日の深度 5cm および 15cm の地温変化を図 3.2 に示す。この図より、深度 5cm および 15cm においては畝形状の方が平張りよりも地温が高くなる傾向にある。これは、地表面の形状が深度の浅いところの地温に及ぼす影響が大きいことを示している。

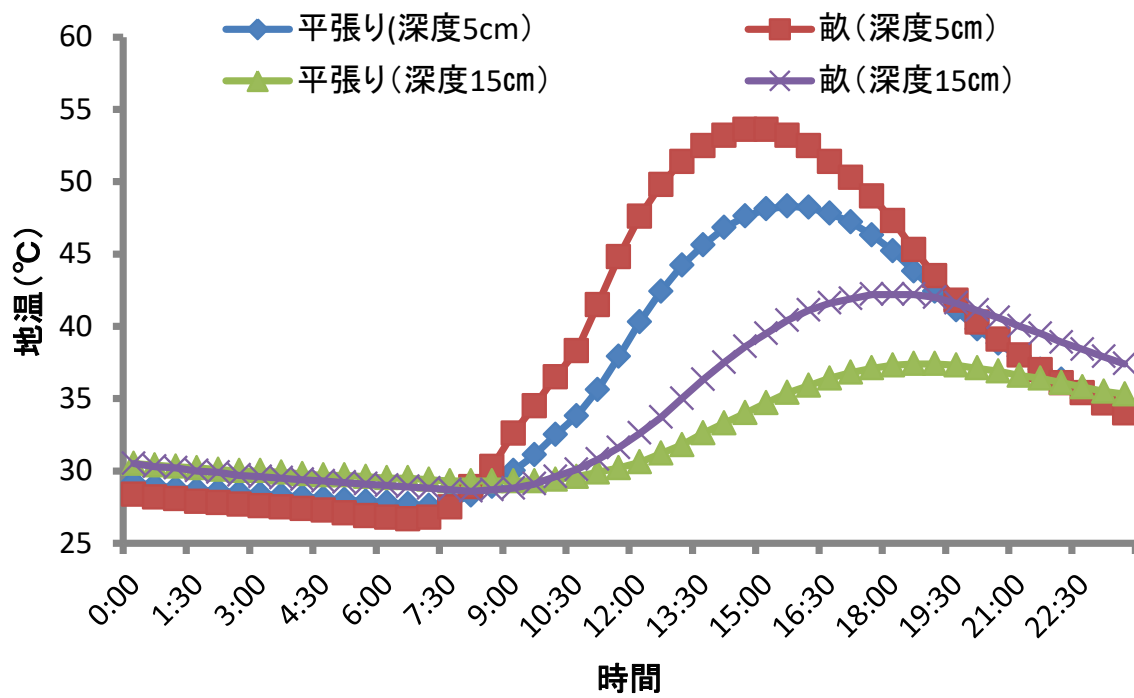


図 3.2 畝の形状の違いによる地温の日変化

(長崎県農林開発センター馬鈴薯研究室)

3.3 陽熱負荷量の近似モデル

3.3.1 負荷基準温度の導入

土壌病原菌への熱負荷を検討するために、恒温環境下における主な病原菌の死滅条件(先行研究①)を図 3.3 に整理する。この図より、病原菌の死滅条件はある一定の温度以上であり、同じ菌でも高い処理温度の時は処理時間が短くなる傾向にあることがわかる。実際、死滅条件の処理温度で最も低いのはキュウリホモプシス根腐病原菌の 38℃であり、多くの病原菌の処理温度は 40℃以上になっている。また死滅条件の処理時間で最も長いのはカブ根こぶ病菌の 720 時間(処理温度 40℃)であり、処理温度が 43℃以上であれば、どの病原菌の処理時間が 100 時間以下になる。

本研究で対象とする土壌病原菌の死滅条件を先行研究①を基に表 3.6 にまとめる。この表では病原菌の生息数が 0 になる死滅条件が示されているが、死滅条件(処理温度と処理時間の積)に満たない場合でも、病原菌の生息数が減少していると考えられる。すなわち、病原菌がその生息数を減少させる環境温度が存在すると推定できる。この温度を負荷基準温度と呼ぶことにする。本研究で対象とする土壌病原菌に対する負荷基準温度は、表 3.6 より 40℃前後に設定してよいことがわかる。そこで、本章では負荷基準温度を T_c と表し、 $T_c = 40℃$ と設定して以降の議論を進める。

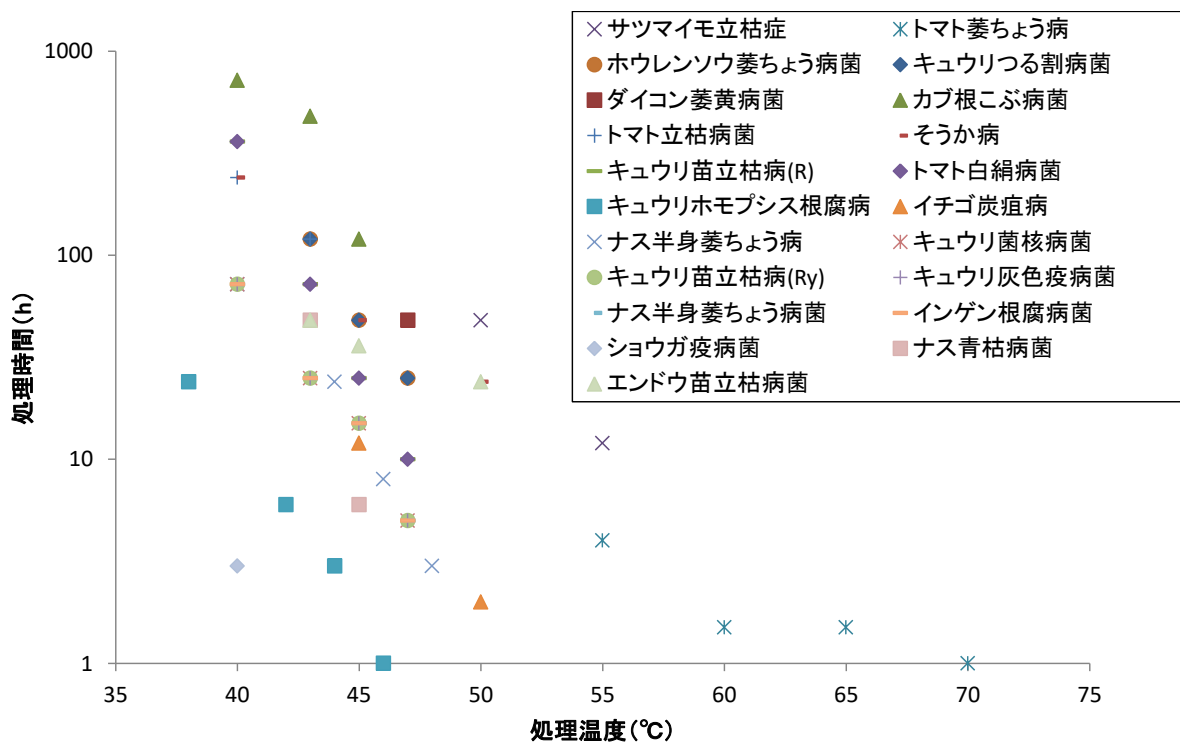


図 3.3 土壌病原菌の死滅温度と時間の関係

表 3.6 そうか病菌と立枯病菌の

死滅温度と処理温度と熱負荷量 ($T_c=40^{\circ}\text{C}$)

土壌病原菌	処理温度 (°C)	処理方法	積算処理時間 (時間)
そうか病菌	40	恒温処理	240
	43		72
	45		48
	50		24
トマト立枯病菌	40	恒温処理	240
	43		120
エンドウ苗立枯病菌	43	恒温処理	48
	45		36
	50		24

3.3.2 陽熱負荷量の定義

土壌中の病原菌が受ける熱負荷を、負荷基準温度を超える温度とし、土壌中に蓄積される熱負荷量を、熱負荷の処理時間内の積分として次式のように表し、それを陽熱負荷量 (*SHLA: Solar Heat Load Amount*) と定義する。

$$SHLA = \int_{h_1}^{h_2} \Delta T(t) dt \quad \Delta T(t) = \max(T_s(t) - T_c, 0) \cdot \cdot \cdot \cdot (3.1)$$

ここで、 h_1 と h_2 は、それぞれ処理時間の開始と終了時刻であり、 $T_s(t)$ は処理温度であり、 $\Delta T(t)$ は熱負荷を意味する。 T_c は病原菌の負荷基準温度であり、前述したように、 $T_c = 40^\circ\text{C}$ に設定する。また、熱負荷を対象としているので、 $T_s(t)$ が負荷基準温度 (T_c) 以下の時は 0 と見做す。

また、太陽熱を利用した土壌消毒は長期間に亘って実施されるので、消毒期間中の陽熱負荷量は消毒期間内の 1 日の陽熱負荷量 (日陽熱負荷量と呼ぶ) の積算として求める。日陽熱負荷量 ($SHLA_d$) は次式 (3.2) によって与えられる。

$$SHLA_d = \int_0^{24} \Delta T(t) dt \quad \Delta T(t) = \max(T_s(t) - T_c, 0) \cdot \cdot \cdot \cdot (3.2)$$

本章では上で定義した日陽熱負荷量の近似モデルを構築する。また近似モデル構築に際しては、土壌環境を考慮するために基準とする実験地における日陽熱負荷量の推定式を利用する。

3.3.3 日陽熱負荷量に対する推定や近似の精度に対する評価

日陽熱負荷量の推定や近似の誤差の検証のために、相対誤差平均と *RMSE* (二乗平均平方根誤差) を用いる。まず、相対誤差平均は次式 (3.3) で計算される。

$$\text{相 対 誤 差 平 均} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left| \frac{y_i - \hat{y}_i}{\hat{y}_i} \right| = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \sqrt{\left(\frac{y_i - \hat{y}_i}{\hat{y}_i} \right)^2} \cdot \cdot \cdot (3.3)$$

ここで、 N は実測データ数であり、 y_i は実測値であり、 \hat{y}_i は推定値である。相対誤差平均は、その値が小さいほど、精度が高いと見做す。次に $RMSE$ (二乗平均平方根誤差)は次式(3.4)で計算される。

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (y_i - \hat{y}_i)^2} \cdot \cdot \cdot (3.4)$$

ここで、 N は実測データ数であり、 y_i は実測値であり、 \hat{y}_i 推定値である。 $RMSE$ も相対誤差平均と同様、その値が小さいほど、精度が高いと見做す。

3.3.4 日最高地温による日陽熱負荷量推定

(3.2)式で与えられる日陽熱負荷量をその日の地温の最高値を用いて推定することを考える。今、 ΔT を測定深度における日最高地温に対する熱負荷として次式のように設定する。

$$\Delta T = \max(\text{最高地温} - T_c, 0) \quad T_c: \text{負荷基準温度} \cdot \cdot \cdot (3.5)$$

各地温測定地における測定日の ΔT と日陽熱負荷量との関係を図 3.4 に示す。ここで、図内のデータは、測定深度での最高地温が負荷基準温度を超えていた日のものだけに限っていることに注意する。

今、日陽熱負荷量を次式のような ΔT のべき関数で推定するとき、

$$SHLA_d \doteq A_0 \cdot (\Delta T)^{B_0} \quad \Delta T = \max(\text{最高地温} - T_c, 0) \cdot \cdot \cdot (3.6)$$

個々の実験データに対して最小二乗法によって推定される A_0 と B_0 の値を図 3.5 に示す。図 3.5 より、 A_0 はいずれの測定深度でも広く分布していることがわかる。一方、 B_0 は深度 15cm の外れ値と思われ

る点を除いて比較的狭い範囲に集中していることがわかる。これらより、 A_0 は深度以外にも影響要因が考えられるが、 B_0 の影響要因は深度のみと考えてよい。すなわち、日陽熱負荷量を ΔT のべき関数として表現した場合の指数((3.6)式の右辺の B_0)は、深度の関数として表現でき、係数((3.6)式の右辺の A_0)は深度以外にも影響要因を考慮しなければならない。

そこで B_0 に関して、全実験地の深度ごとのデータ数にばらつきがあるので、それぞれの深度での平均値を求め、その回帰直線を図 3.6 に示す。この図より、 B_0 は次のように表現できることが分かる。

$$B_0 = 1.4970 + 0.0086 \times D_r \quad \cdot \cdot \cdot \cdot (3.7)$$

ここで、 D_r は測定深度 [cm]を意味する。

一方 A_0 に関して、3.2.3節でも述べたように、 A_0 は深度以外に土壌環境が影響していると思われるので、土壌環境を統一するために基準とする実験地を定める必要がある。そこで、基準とする実験地(基準実験地)として、有機資材を施肥せず、すべての測定深度において計測している和歌山県農業試験場を採用し、そこで得られる A_0 を基準とする。和歌山県農業試験場のデータに対して、(3.7)式で与えられる B_0 を用いた場合の A_0 の深度ごとの平均とその回帰直線を図 3.7 に示す。この図より、 A_0 は次のように表現できることが分かる。

$$A_0 = 1.4876 + 0.0454 \times D_r \quad \cdot \cdot \cdot \cdot (3.8)$$

ここで、 D_r は測定深度 [cm]を意味する。以上の事より、日陽熱負荷量の推定基準($SHLA_{d0}$)を次式のように設定する。

$$SHLA_{d0} = (1.4876 + 0.0454 \times D_r) \Delta T^{1.4970 + 0.0086 \times D_r} \quad \cdot \cdot \cdot \cdot (3.9)$$

ここで、 D_r は測定深度 [cm]を意味する。

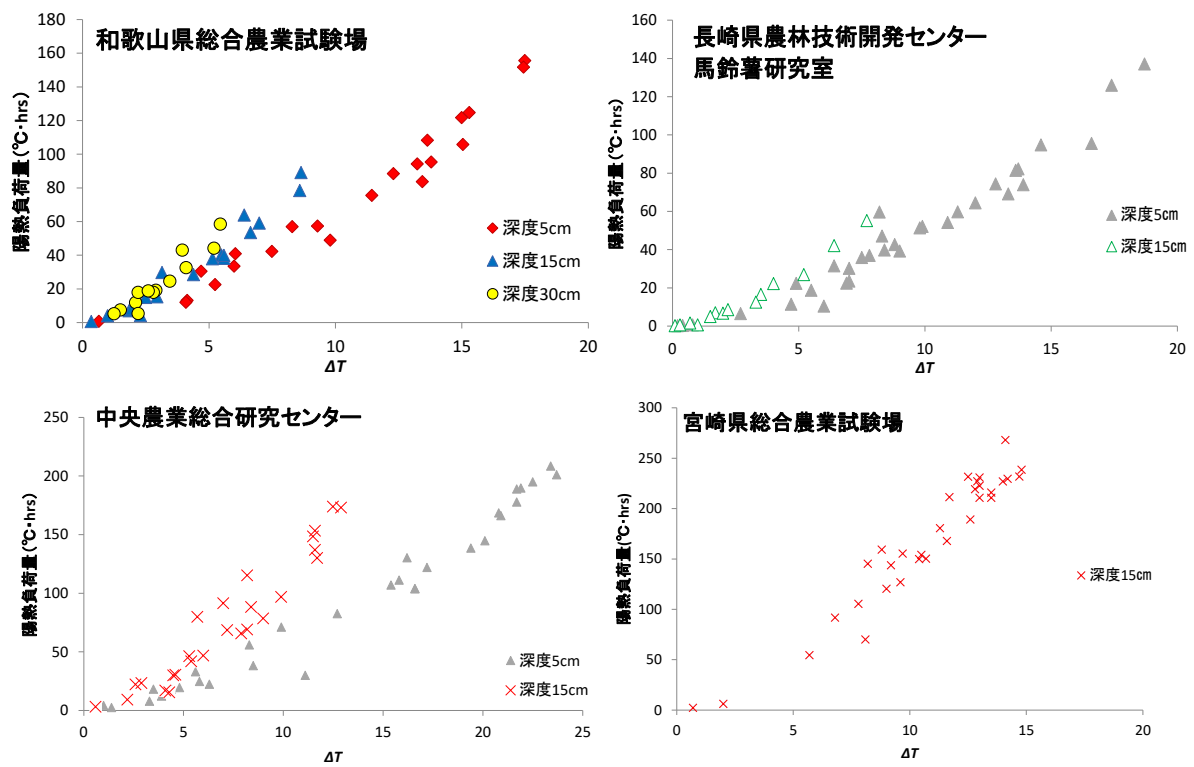


図 3.4 各地温測定地における測定日の ΔT と日陽熱負荷量

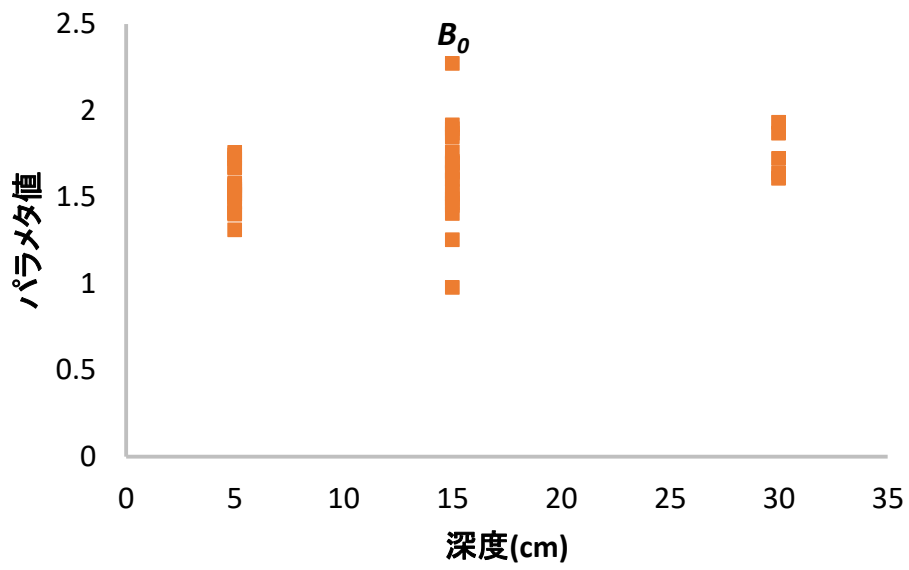
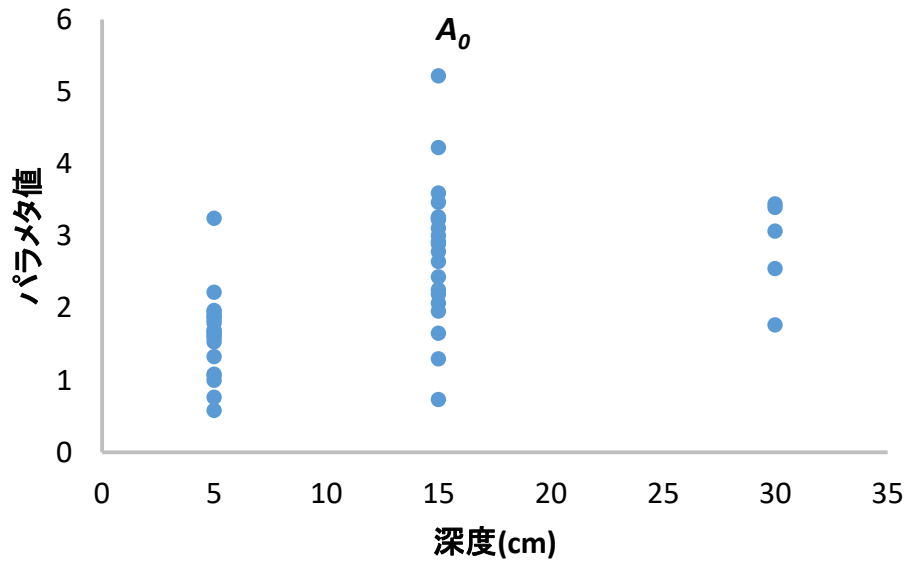


図 3.5 最小二乗法によって推定される A_0 と B_0 の値

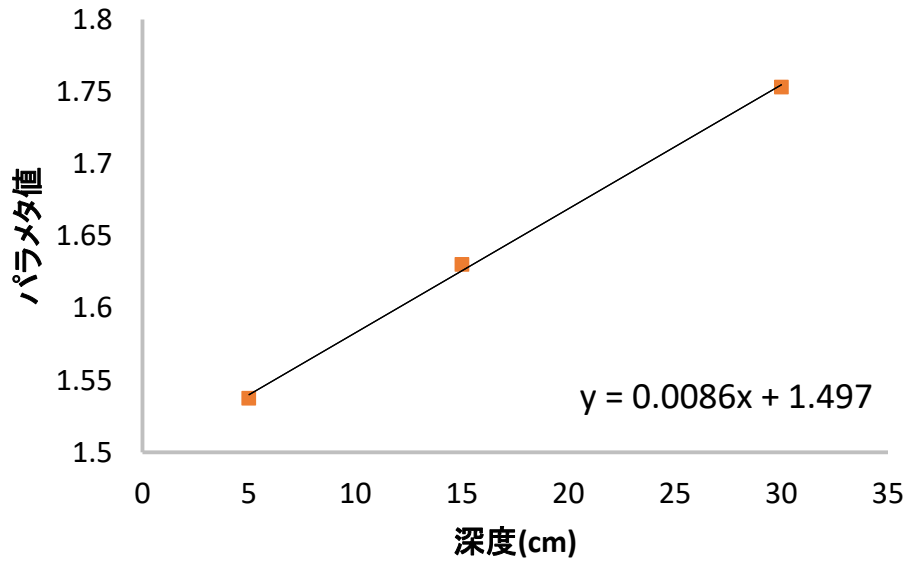


図 3.6 B_0 の値の深度ごとの平均に対する回帰直線

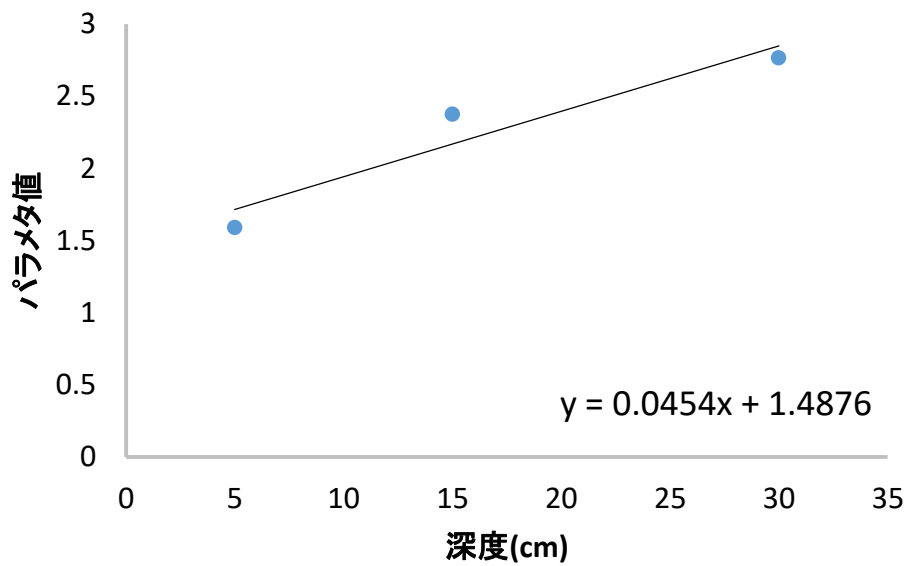


図 3.7 A_0 の値の深度ごとの平均に対する回帰直線

3.3.5 日陽熱負荷量の近似モデルの構築

3.2.3 節および 3.3.4 節で述べたように、日陽熱負荷量は土壤環境の影響を受けることが想定されるので、我々の日陽熱負荷量の近似モデルは次式のように、(3.9)式で設定した日陽熱負荷量の推定基準の定数倍と考える。

$$K \cdot SHLA_{d0} = K \cdot (1.4876 + 0.0454 \times D_r) \Delta T^{1.4970 + 0.0086 \times D_r} \dots (3.10)$$

ここで、 K は土壤の状況によって定められる定数であり、土壤環境補正係数と呼ぶ。まず、推定基準式((3.10)式において、 $K=1$ の場合)と基準実験地以外の実験データとのずれを表 3.7 に示す。この表より、相対誤差平均が比較的少ない実験箇所もあれば、相当に大きな誤差がある実験箇所もあり、相対誤差平均が最大で 165.38%にもなっている。以下では、特徴的な土壤環境の実験箇所を取り上げて、土壤補正係数 K の推定を試みる。

(1) 畝立て、マルチ被覆有り、粒王 7 号(動物性有機肥料)、露地、深度 5cm。長崎県農林技術開発センター馬鈴薯研究室の実験地の実測データと日陽熱負荷量の推定基準式とのグラフと、最小 2 乗法によって土壤環境補正係数 K を指定した後のグラフを図 3.8 に示す。この図より、土壤環境補正係数 K を適切に設定すると、実測データへの適合度が高まっていることが分かる。実際、推定基準式に対する相対誤差平均は 21.82%、RSME=12.73 であるが、補正後の相対誤差平均は 15.24%、RSME=6.99 まで落ちている。

(2) 焼酎粕濃縮液アミノハッピー、マルチ被覆有り、密閉ハウス、深度 15cm。宮崎県総合農業試験場の実験地の実測データと日陽熱負荷量の推定基準式とのグラフと、最小 2 乗法によって土壤環境補正係数 K を指定した後のグラフを図 3.9 に示す。この図より、土壤環

境補正係数 K を適切に設定すると、実測データへの適合度が高まっていることが分かる。実際、推定基準式に対する相対誤差平均は 45.71%、RSME=48.54 であるが、補正後の相対誤差平均は 12.69%、RSME=16.05 まで落ちている。

(3) 焼酎粕濃縮液アミノハッピー、マルチ被覆無し、密閉ハウス、深度 15cm。(2)と同じ実験地の実測データと日陽熱負荷量の推定基準式とのグラフと、最小 2 乗法によって土壌環境補正係数 K を指定した後のグラフを図 3.10 に示す。この図より、土壌環境補正係数 K を適切に設定すると、実測データへの適合度が高まっていることが分かる。実際、推定基準式に対する相対誤差平均は 117.68%、RSME=7.8 であるが、補正後の相対誤差平均は 20.45%、RSME=1.5 まで落ちている。

ここで、(2)と(3)の違いはマルチ被覆の有無であり、被覆有りの方が被覆無しより土壌補正係数が低くなっている事に注意する。この理由については今後の課題とする。

このように、特徴的な土壌環境において、土壌環境補正係数を適切に設定すると、実測データとよく適合することが分かる。そこで、表 3.7 の示した実験データに対して土壌補正係数を適切に推定した後の状況を表 3.8 に示す。この表から分かるように、(3.10)式で与えられる近似モデルを採用すると、相対誤差平均は最大でも 40.65% に抑えられる。また、このときの土壌環境補正係数の値の範囲は 0.85~2.61 の範囲になっている。

表 3.7 基準実験地以外における推定基準式と実験データとのずれ

条件	マルチ被覆の有無	施用資材	深さ(cm)	相対誤差平均(%)	RMSE	土壌環境補正係数
露地(畝立て)	有	粒王7号(動物質有機肥料)	5	21.82	12.73	1.00
露地(平張り)	有	馬鈴薯特号(化学肥料)	5	14.26	2.90	1.00
露地(平張り)	無	ソイルサブリレット(植物質)	5	21.55	1.25	1.00

条件	マルチ被覆の有無	施用資材	深さ(cm)	相対誤差平均(%)	RMSE	土壌環境補正係数
密閉ハウス	有	有機アグレット666	5	19.55	20.83	1.00
密閉ハウス	有	有機アグレット666	15	40.23	21.08	
密閉ハウス	有	焼酎粕濃縮液 アミノハッピー	5	20.07	21.21	1.00
密閉ハウス	有	焼酎粕濃縮液 アミノハッピー	15	38.24	21.57	
密閉ハウス	無	有機アグレット666	5	10.10	4.80	1.00
密閉ハウス	無	有機アグレット666	15	77.42	5.04	

条件	マルチ被覆の有無	施用資材	深さ(cm)	相対誤差平均(%)	RMSE	土壌環境補正係数
密閉ハウス	有	焼酎粕濃縮液チューブ処理	15	45.71	48.54	1.00
密閉ハウス	有	有機肥料(市販)	15	58.23	65.66	1.00
密閉ハウス	有	高温耐性+硝化細菌+焼酎粕濃縮液チューブ処理	15	50.55	52.86	1.00
密閉ハウス	有	高温耐性+硝化細菌+有機肥料(市販)	15	62.97	49.24	1.00
密閉ハウス	有	無肥料	15	55.55	47.67	1.00
密閉ハウス	無	有機肥料(市販)	15	165.38	8.73	1.00
密閉ハウス	無	焼酎粕濃縮液チューブ処理	15	117.68	7.80	1.00

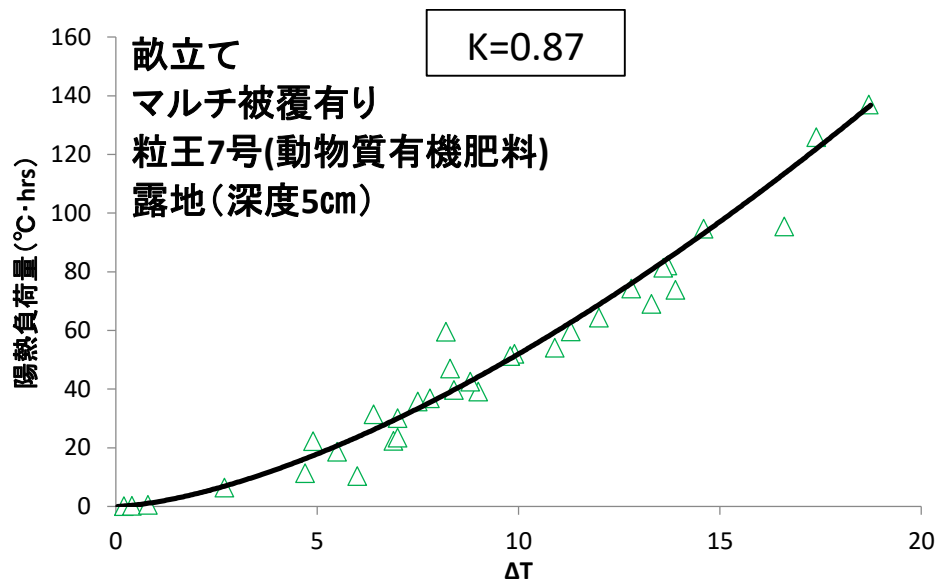
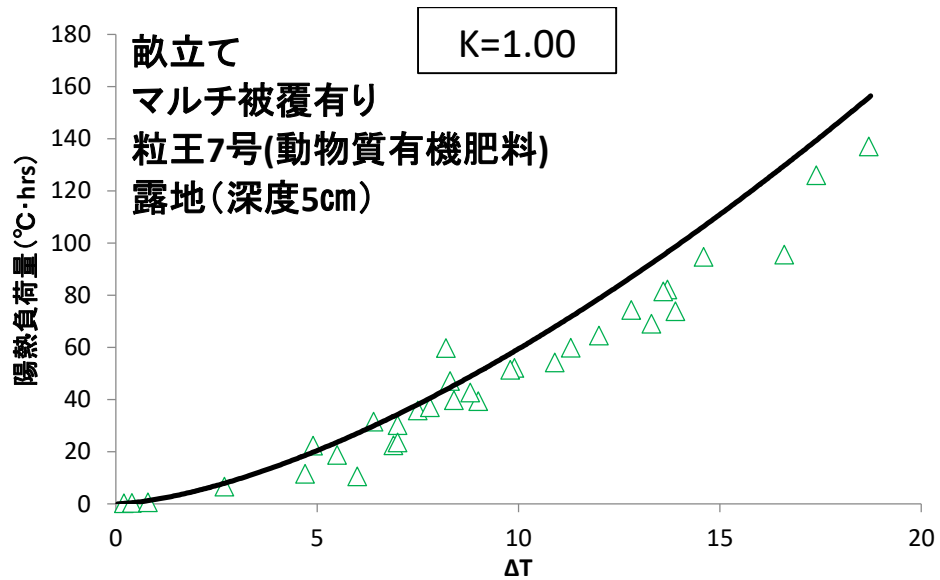


図 3.8 土壤環境補正係数の値による適合度

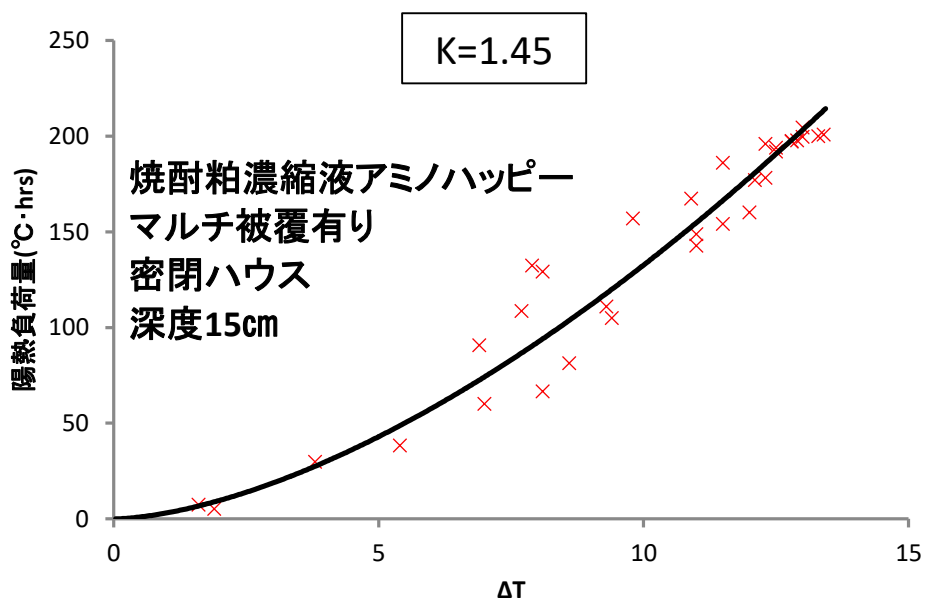
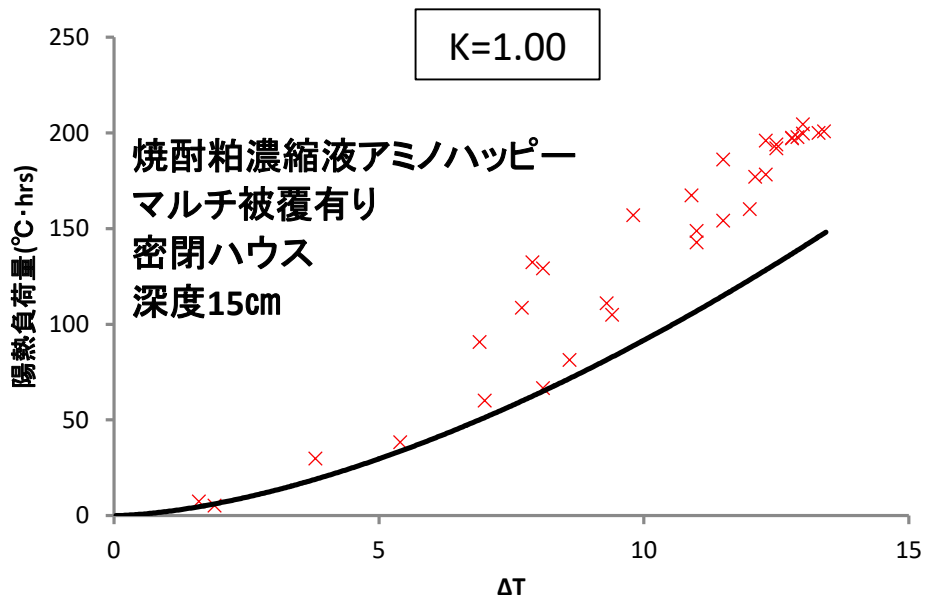


図 3.9 土壤環境補正係数の値による適合度

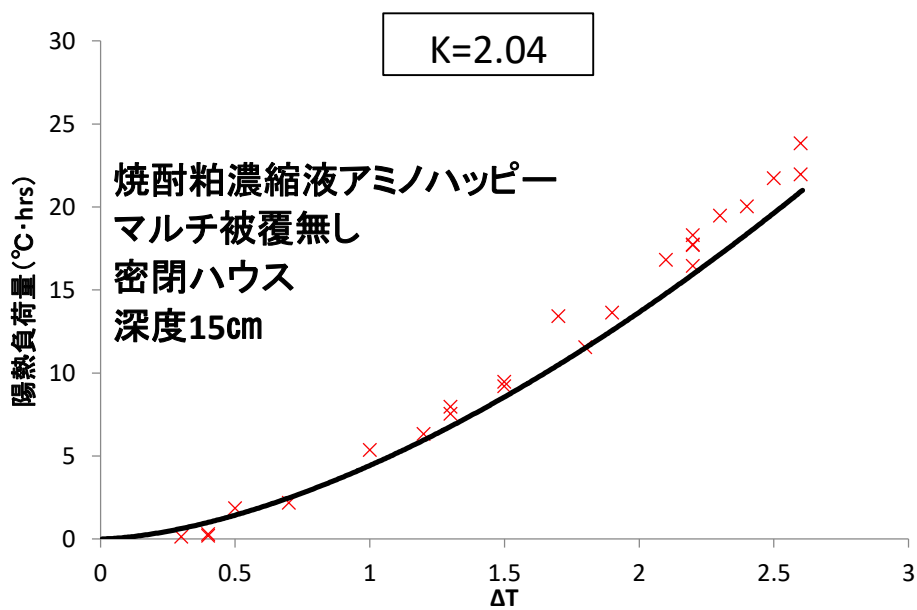
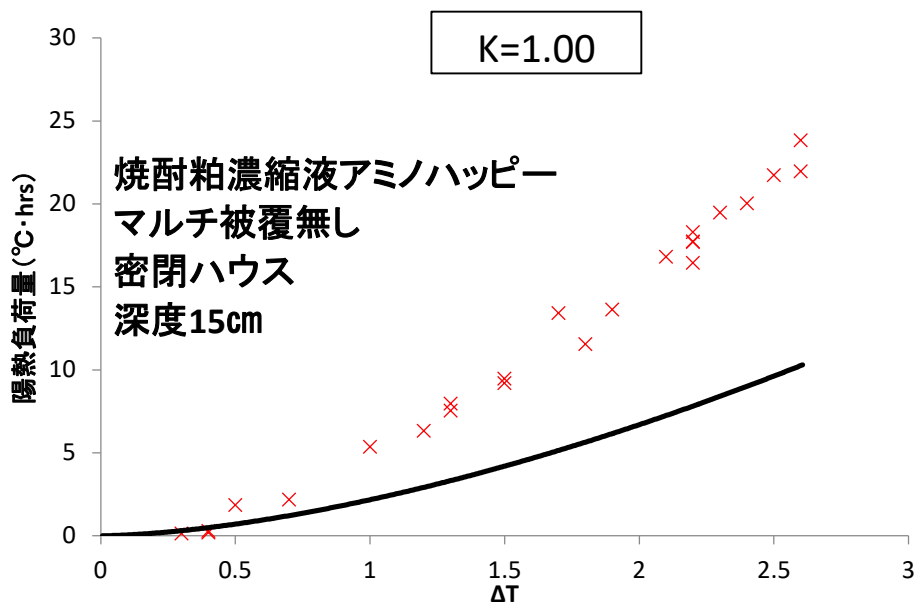


図 3.10 土壤環境補正係数の値による適合度

表 3.8 表 3.7 の示した実験データに対して
 土壌補正係数を適切に推定した後の状況

条件	マルチ被覆の有無	施用資材	深さ(cm)	相対誤差平均(%)	RMSE	土壌環境補正係数
露地(畝立て)	有	粒王7号(動物質有機肥料)	5	15.24	6.99	0.87
露地(平張り)	有	馬鈴薯特号(化学肥料)	5	14.19	2.84	0.99
露地(平張り)	無	ソイルサブリペレット(植物質)	5	22.03	1.28	0.85

条件	マルチ被覆の有無	施用資材	深さ(cm)	相対誤差平均(%)	RMSE	土壌環境補正係数
密閉ハウス	有	有機アグレット666	5	22.95	34.71	1.09
密閉ハウス	有	有機アグレット666	15	32.32	16.44	
密閉ハウス	有	焼酎粕濃縮液 アミノハッピー	5	22.66	31.20	1.07
密閉ハウス	有	焼酎粕濃縮液 アミノハッピー	15	31.92	18.01	
密閉ハウス	無	有機アグレット666	5	26.78	19.04	1.31
密閉ハウス	無	有機アグレット666	15	40.65	1.20	

条件	マルチ被覆の有無	施用資材	深さ(cm)	相対誤差平均(%)	RMSE	土壌環境補正係数
密閉ハウス	有	焼酎粕濃縮液チューブ処理	15	12.69	16.05	1.45
密閉ハウス	有	有機肥料(市販)	15	11.76	20.10	1.58
密閉ハウス	有	高温耐性+硝化細菌+焼酎粕濃縮チューブ処理	15	11.56	16.48	1.50
密閉ハウス	有	高温耐性+硝化細菌+有機肥料(市販)	15	13.12	13.24	1.62
密閉ハウス	有	無肥料	15	13.01	13.68	1.54
密閉ハウス	無	有機肥料(市販)	15	22.48	3.74	2.61
密閉ハウス	無	焼酎粕濃縮液チューブ処理	15	20.45	1.50	2.04

3.4 まとめ

土壌病原菌の消毒効果に関する先行研究の成果だけでは、実際の農地での適用は難しく、太陽熱消毒法の普及の妨げにもなっていた。そこで本研究では、現場での太陽熱消毒法への適用を想定して、土壌病原菌の消毒効果を定量的に判断する尺度として陽熱負荷量(*SHLA*)を定義した。また、消毒期間内の一日ごとの陽熱負荷量(日陽熱負荷量(*SHLA_d*))を近似するモデルを次式のように構築した。

$$SHLA_d \cong K \cdot (1.4876 + 0.0454 \times D_r) \Delta T^{1.4970 + 0.0086 \times D_r} \cdot \cdot \cdot (3.11)$$

ここで、*K*は土壌環境補正係数と呼ばれ、土壌の環境によって設定される定数であり、*D_r*は土壌中の深度[cm]を意味する。また、 ΔT は次式で設定される土壌中の熱負荷[°C]である。

$$\Delta T = \max(\text{最高地温} - T_c, 0) \cdot \cdot \cdot (3.12)$$

ここで、*T_c*は土壌病原菌に対して定まる負荷基準温度[°C]である。本章では、この負荷基準温度を先行研究①の土壌病原菌の死滅条件を参考に *T_c* = 40°C と設定した。この近似モデルを用いると、本研究で計測した陽熱負荷量データは、土壌環境補正係数を適切に推定する時、相対誤差平均 40.65%以内で近似できた。

本研究の結果を受けて負荷基準温度の適切な設定、土壌補正係数の定め方や近似モデルの近似誤差の改善などについては今後も引き続き検討していく。

第 4 章 陽熱負荷指数と土壌病原菌の消毒との関係

4.1 はじめに

第 3 章において、現場での太陽熱消毒法への適用を想定して、土壌病原菌の消毒効果を定量的に判断する尺度として陽熱負荷量 (SHLA) を定義し、消毒期間内の一日ごとの陽熱負荷量を近似するモデルを構築した。本章では、馬鈴薯そうか病菌とトマト立枯病菌の消毒を対象とした太陽熱土壌消毒において、圃場から実測された日陽熱負荷量と構築したモデルから導き出される日陽熱負荷量との関係から、これらの菌の消毒目安を検討した。また、他の各種土壌病原菌の消毒効果と陽熱負荷量との関係については、過去の文献の恒温処理実験の結果を用いて検討した。

4.2 材料および方法

4.2.1 そうか病の調査方法

実験場所は、第 3 章の地温測定を実施した地点と同じ、長崎県雲仙市愛野町に位置する長崎県農林技術開発センター馬鈴薯研究室の圃場で馬鈴薯の二期作地帯である。各処理方法、温度測定及び処理試験区の概要については第 3 章の 3.2.2-(2) 節の表 3.3 を参照する。

供試した品種は、長崎県で一般的に栽培されている「ニシユタカ」である。栽植密度は、畦幅 60cm 株間 20cm であり、833 株/a を栽培した。1 試験区の調査株数は 5 株 (0.6 m²) であり、2 区制の 2 反復で実施した。

そうか病の発病度判定方法は、日本植物防疫協会防除効果試験の方法に従い、塊茎表面の発病程度(指数)を無(0)、少(1)、中(2)、多

(3)、甚(4)の5段階に区分し、各発病程度別塊莖数をそれぞれ $n(0)$ 、 $n(1)$ 、 $n(2)$ 、 $n(3)$ 、 $n(4)$ とし、次式(4.1)式により発病度を算出した。

また、発病塊莖率は、次式(4.2)式により算出した。

$$\text{発病度} = \Sigma(\text{発病指数} \times \text{当該塊莖数}) / (4 \times \text{調査塊莖数}) \times 100 \dots (4.1)$$

$$\text{発病塊莖率} = \text{病斑のあるもの数} / \text{全調査いも数} \times 100 \dots (4.2)$$

発病度；発病程度を示す指数で、0～100(最大)である。

4.2.2 トマト立枯病の調査方法

実験場所は、第3章の地温測定を実施した地点と同じ、茨城県つくば市に位置する中央農業総合研究センター観音台圃場のビニールハウス2棟(E1、E2)を用いて実施した。各処理方法、温度測定及び処理試験区の概要については第3章の3.2.2-(4)節の表3.5を参照する。

2014年4月23日にハウス圃場においてパーミキュライトふすま培地で25℃1ヶ月間培養した立枯病菌(P7nit4-1菌株)を7kg/aの割合で播種し、小型管理機で表層約20cmの深度まで混和し、播種50日後のトマト苗(「桃太郎」、自根)を定植し、栽培した。6月10日にトマト地際部が黒変した株を確認し、立枯病の初発とした。7月9日の発病調査において、発病株のうち5株を抜き取り、地際罹病部から塩素酸カリウム濃度を3%に改変した *nit* 変異株選択培地 MMCPA 培地(竹原, 國安, 1994)を用いて病原菌の分離を試みたところ、供試したすべての発病体から P7nit4-1 菌株が分離されることを確認した。立枯病発症後の7月28日と太陽熱土壌消毒後の9月2日に土壌コアサンプラーを用いて、地上部より深さ5cm及び15cmの土壌を採取した。採取土壌は、MMCPA培

地を用いた希釈平板法により立枯病菌株の密度を測定し、太陽熱土壌消毒前の乾土 1g あたりの菌密度(検出限界は $1.0 \times 10^1 \text{cfu/g}$ 乾土)を求めた。

土壌はそれぞれハウス圃場内 3 か所から採取し、サンプルあたり 2 回反復して菌数を測定し、平均値をその圃場の菌密度とした。

また、同実験を 2015 年にも実施した。2015 年実験における太陽熱消毒開始日は 9 月 4 日であり、同年 10 月 16 日に終了した(越智ら, 2015)。

4.2.3 文献調査と熱負荷量との関係

太陽熱土壌消毒法が 1976 年に提案されてから土壌病害虫の研究者は、土壌病原菌の死滅条件を処理温度と処理時間の関係から報告している(愛知県, 2010: 橋本ら, 1980: 家村, 1986: 石松ら, 2013: 伊達ら, 1989: 片山ら, 2003: 越智ら, 2015: 小玉ら, 1979: 小玉ら, 1982: 久保ら, 2004: 國安ら, 1986: 松尾ら, 2014: 永尾ら, 2015: 西, 2014: 小山田ら, 2003: 坂口ら, 1982: 塩見ら, 1989: 清水ら, 1983: 清水ら, 1985: 鈴木ら, 1983: 高見ら, 2015: 谷名ら, 2009: 山崎ら, 2012-3)。本論は、先行研究結果から得られた処理温度と処理時間を用いて次式(4.3)より熱負荷量(HA)を求め、土壌病原菌の消毒との関係を検討した。

$$HA = (T - T_c) \times Hr \dots (4.3)$$

ここで、T は処理温度で、Hr は処理時間である。T_c は病原菌の負荷基準温度であり、第 3 章でも既述したように T_c = 40°C に設定する。

4.3 実験結果と考察

4.3.1 日陽熱負荷量と馬鈴薯そうか病との関係

馬鈴薯そうか病の発病塊莖率及び発病度と太陽熱土壌消毒期間の日陽熱負荷量の積算値を表 4.1 に示す。太陽熱土壌消毒法を実施しなかった春作馬鈴薯のそうか病の発病塊莖率は、畝立て区で 94.4%、平張り区で 87.6%および平張り被覆無し区で 87.0%であり、各処理区においても極めて高い発病率であった。発病度は、畝立て区で 49.5、平張り区で 45.7 および平張り被覆無し区で 50.0 であった。このように、そうか病発生が確認された圃場に、6 月以降に緑肥作物を栽培して、梅雨明け後に太陽熱土壌消毒を実施し、消毒後に定植した。秋作馬鈴薯の発病塊莖率を調査した結果は、畝立て区で 2.4%、平張り区で 1.0%および平張り被覆無し区で 18.8%であり、各処理区とも春馬鈴薯に対して減少した。発病度は、畝立て区で 0.6、平張り区で 0.3、平張り被覆無し区で 5.0 であり、各処理区とも減少した。したがって、太陽熱土壌消毒法を実施することによってそうか病菌の発生率が抑制されていることが示唆された。

この時の太陽熱土壌消毒期間中の地温測定深度は 5cm で、負荷基準温度 40℃ の条件における実測された日陽熱負荷量の積算値は、畝立て区で 1591.5℃・hrs、平張り区で 688.0℃・hrs および平張り被覆無し区で 64.2℃・hrs であった。

一方、構築したモデルから導き出される日陽熱負荷量の積算値は、畝立て区で 1643.1℃・hrs、平張り区で 692.9℃・hrs および無処理区で 64.3℃・hrs であった。これらの値は、実測値に比べて、畝立て区で 3.2%増加し、平張り区で 0.7%増加し、無処理区で 0.2%減少し、すべて 5%未満の誤差範囲であることから、モデルから導き出され

る日陽熱負荷量の積算値は、実測された日陽熱負荷量の積算値をよく表していることが示唆された。

恒温室実験において、そうか病菌は処理温度が 50°C で、処理時間が 24 時間以上で死滅すると報告されており(西,2014)、この条件での陽熱負荷量は、(4.3)式から $240^{\circ}\text{C}\cdot\text{hrs}$ である。この値は、病原菌の直接局所的効果によるものであるため、圃場への適応においては、土壤の地温変化は広域的で天候や土壤の物理性等により左右されるため難しく、実際の日陽熱負荷量は室内実験に比べて高くなると推測される。したがって、太陽熱土壤消毒にける馬鈴薯そうか病菌の消毒に対する日陽熱負荷量の積算値の目安は、深度 5cm で負荷基準温度が 40°C の条件において $688.0^{\circ}\text{C}\cdot\text{hrs}$ 以上であると結論付けられる。この値は、恒温室実験の $240^{\circ}\text{C}\cdot\text{hrs}$ に比べて約 2.9 倍の値であった。

表 4.1 そうか病の発病塊茎率及び発病度と太陽熱土壤消毒期間中の陽熱負荷量の積算値との関係(2014年)

	2014年		2014年		太陽熱消毒期間中の	
	春作	秋作	春作	秋作	陽熱負荷量の積算値	
	発病塊茎率(%)		発病度		(°C・hrs)(深度5cm)	
太陽熱土壤消毒	無し	有り	無し	有り	実測値	推定値
畝立て区	94.4	2.4	49.5	0.6	1591.5	1643.1
平張り区	87.6	1.0	45.7	0.3	688.0	692.9
平張り無被覆区	87.0	18.8	50.0	5.0	64.2	64.3

4.3.2 日陽熱負荷量とトマト立枯病との関係

中央農業総合研究センター観音台圃場での各試験区における地温測定深度が 5cm と 15 cm であり、死滅温度 40℃ 以上の陽熱負荷量とトマト立枯病の検出限界以上の菌体数との関係を図 4.1 示す。太陽熱土壌消毒期間中の地温測定深度は 5cm で、負荷基準温度 40℃ の条件における実測された日陽熱負荷量の積算値が、2896.0℃・hrs、2964.7℃・hrs 及び 3321.6℃・hrs の時、トマト立枯病菌が消毒された。

一方、この条件における構築したモデルから導き出される日陽熱負荷量の積算値は、それぞれ 3469.4℃・hrs、3495.1℃・hrs および 3881.1℃・hrs であった。これらの値は、実測値に比べて、それぞれ 19.8%増加し、17.9%増加し、16.8%増加し、約 20%未満の誤差範囲で過大評価された。

太陽熱土壌消毒期間中の地温測定深度は 15cm で、負荷基準温度 40℃ の条件における実測された日陽熱負荷量の積算値が、それぞれ 1117.8℃・hrs、1276.7℃・hrs、1573.8℃・hrs および 1950.3℃・hrs の時、トマト立枯病菌は消毒された。

一方、この条件における構築したモデルから導き出される日陽熱負荷量の積算値は、それぞれ 970℃・hrs、1074.3℃・hrs、1366.2℃・hrs および 1748.5℃・hrs であった。これらの値は、実測値に比べて、それぞれ 15.2%減少し、18.8%減少し、15.1%減少し、11.5%減少し、約 20%未満の誤差範囲で過小評価された。

恒温室実験において、トマト立枯病菌は処理温度が 43℃ で、処理時間が 120 時間以上で死滅すると報告されており(越智ら,2015)、この条件での陽熱負荷量は、(4.3)式から 360℃・hrs である。

以上の結果から、太陽熱土壌消毒にけるトマト立枯病菌の消毒に対する日陽熱負荷量の積算値の目安は、深度 5cm で負荷基準温度が 40℃ の条件において 2896.0℃・hrs 以上であり、深度 15 cm の時、1117.8℃・hrs 以上であると結論付けられる。この値は、恒温室実験の 360℃・hrs に比べて、8 倍及び 3 倍の値であった。

また、これらの条件における本論で構築したモデルから導き出される日陽熱負荷量の積算値を使用する際は、測定深度が 5 cm では過大評価され、15 cm では過小評価されるため、注意する必要があることが明らかとなった。

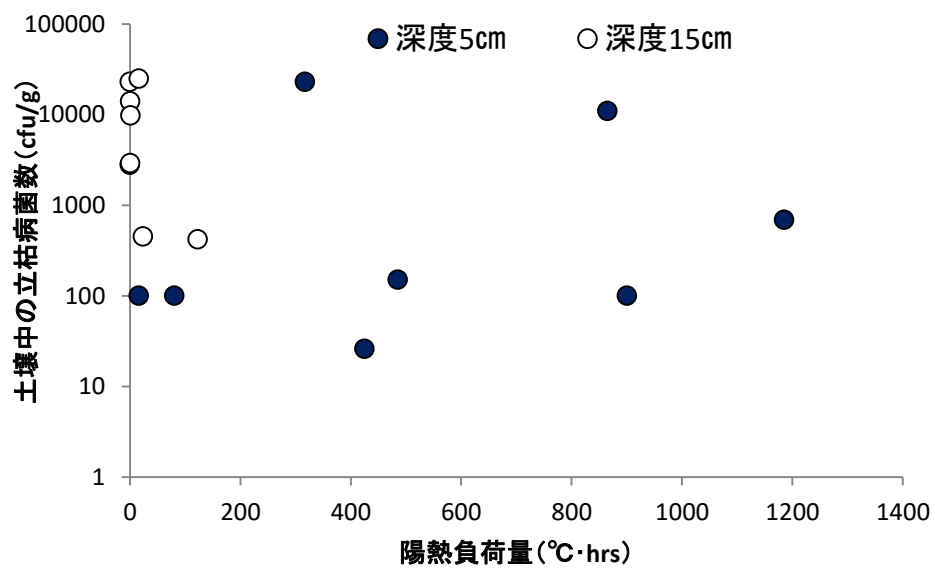


図 4.1 深度 5cm および 15 cm における設定温度 40°C の陽熱負荷量とトマト立枯病の検出限界以上の菌体数との関係

4.3.3 日熱負荷量と各種土壌病原菌の消毒との関係

先行研究の結果の処理温度と処理時間を用いて(4.3)式から各種土壌病原菌の熱負荷量を求めた。各種土壌病原菌の消毒に対する熱負荷量を図 4.2 に示した。図 4.2 の結果から、本研究では、熱負荷量別に 3 種類の菌体領域に分類することができる。

第 1 領域は熱負荷量が $100^{\circ}\text{C}\cdot\text{hrs}$ 以下の低温域で病原菌の種類は、キュウリホモプシス根腐病、イチゴ炭疽病、キュウリ菌核病菌、キュウリ苗立枯病 (Ry)、キュウリ灰色疫病菌、ナス半身萎ちよう病菌、インゲン根腐病菌及びナス半身萎ちよう病であり、この領域のことを本論では低熱負荷領域菌体と呼ぶこととする。

第 2 領域は熱負荷量が $200\sim 300^{\circ}\text{C}\cdot\text{hrs}$ 未満の範囲で死滅するキュウリ苗立枯病 (R)、エンドウ苗立枯病菌、トマト白絹病菌及びそうか病菌は、中陽熱負荷領域菌体とする。

第 3 領域は熱負荷量が $300^{\circ}\text{C}\cdot\text{hrs}$ 以上で死滅するダイコン萎黄病菌、ハウレンソウ萎ちよう病菌、キュウリつる割病菌、トマト立枯病菌及びサツマイモ立枯病菌は、高熱負荷領域菌体とする。

この結果は、病原菌の直接局所的効果によるものであるため、圃場においては、この値よりも高くなると推察される。

例えば、本研究の対象病原菌である馬鈴薯そうか病菌は、中陽熱負荷領域菌体で、トマト立枯病菌は高熱負荷領域菌体であり、本研究結果から、圃場での日陽熱負荷量の積算値は、恒温処理実験に比べてそれぞれ約 2.9 倍および 8 倍高くなった。したがって、太陽熱土壌消毒にける消毒に対する日陽熱負荷量の積算値の目安は、深度 5cm で負荷基準温度が 40°C の条件においてそれぞれ、中陽熱負荷領域菌体が $580\sim 870^{\circ}\text{C}\cdot\text{hrs}$ 未満の範囲であり、高熱負荷領域菌体が

2400℃・hrs 以上であることが推測された。一方、低熱負荷領域菌体については、今後の課題である。

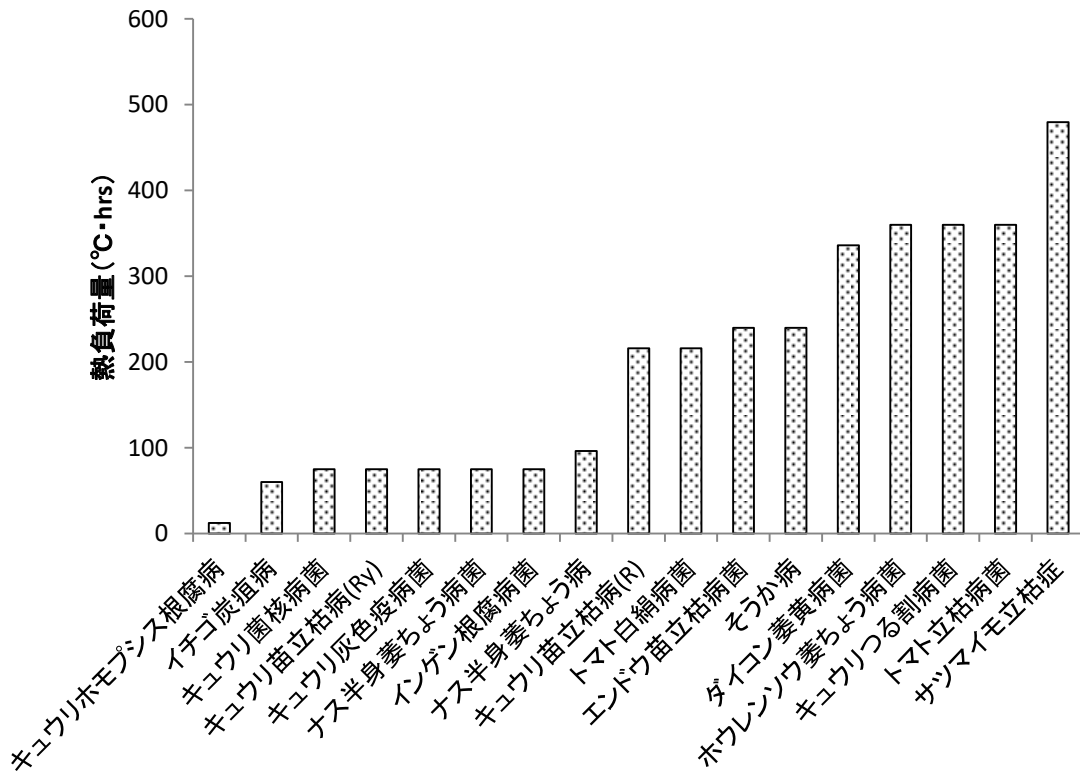


図 4.2 設定温度 40°C の熱負荷量と各種病原菌との関係

4.4 まとめ

長崎県農林技術開発センター馬鈴薯研究室で実施した太陽熱土壌消毒法におけるそうか病の発病度と陽熱負荷量との関係及び中央農業総合研究センター観音台圃場で実施したトマト立枯病の消毒と日陽熱負荷量の積算値との関係について検討した。さらに、過去の文献等から得られる他の各種土壌病原菌と熱負荷量との関係を検討した。

太陽熱土壌消毒にける馬鈴薯そうか病菌の消毒に対する日陽熱負荷量の積算値の目安は、深度 5cm で負荷基準温度が 40℃ の条件において 688.0℃・hrs 以上であることが明らかとなった。

また、太陽熱土壌消毒にけるトマト立枯病菌の消毒に対する日陽熱負荷量の積算値の目安は、深度 5cm で負荷基準温度が 40℃ の条件において 2896.0℃・hrs 以上であり、深度 15 cm の時、1117.8℃・hrs 以上であることが明らかとなった。

恒温室処理実験における土壌病原菌の死滅熱負荷量は温度域で分類ができる。低熱負荷領域菌体の熱負荷量は、100℃・hrs 以下で、中熱負荷領域菌体は、200~300℃・hrs 未満の範囲で、高熱負荷領域菌体は、300℃・hrs 以上で死滅する。この結果は、病原菌の直接局所的効果によるものであるため、圃場においては、この値よりも高くなると推察され、圃場条件下における土壌病原菌の消毒効果と日陽熱負荷量との関係についてデータを蓄積し、関係性を明らかにすることが今後の課題である。

第 5 章 陽熱負荷指数を組み込んだ試作機の開発

5.1 はじめに

露地栽培やハウス栽培における土壌病害虫防除や雑草防除の物理的処理技術の一つである太陽熱土壌消毒法は、1976年頃から始まった(Katan *et al*,1976)。土壌の太陽熱土壌消毒期間の判断は、農家の感と経験で行われており、地域によってもさまざまである。たとえば、九州地域においては、比較的晴天日が連続する時期は、畑地の干ばつ発生時期と重なるので、5月連休明けから梅雨入りまでの時期と7月下旬の梅雨明けから8月の盛夏期までの時期が適期と考えられている(大場ら,1999)。農家が実際に太陽熱土壌消毒法を用いた際の消毒完了を確実に判断する方法は、現在開発されておらず、使用者の経験と勘に委ねられている。

下高ら(2016)は、土壌病原菌の死滅と関係がある温度閾値とそれを維持した時間を基に土壌に蓄積した温度をモデル化し、これを土壌消毒に関係する陽熱負荷量と定義した。この陽熱負荷量を用いることで太陽熱土壌消毒完了の判断が可能となると考えた。この陽熱負荷量を算出するには、日最高地温データと圃場の状態の違いによる土壌深部温度データが必要で、複数の地温測定機が必要となるため、購入経費は農家の経済的負担になる。また、各種地温データを取得したとしても、データ解析には、最低限の情報処理技術を有していなければならないため、ある程度専門的な知識が必要となる問題が生じた。したがって、安価で、簡便で、誰でも消毒完了の判断ができる機能を組み込んだ装置の開発が求められている。さらに、陽熱負荷量と土壌病原菌の死滅との関係を明らかにした研究報告は

少ないため、太陽熱土壌消毒法完了の判断日を決定するために、各種環境条件にて陽熱負荷量と消毒の関係を調査する必要がある。

本研究報告では、開発の初期段階として、市販の電子制御部品により比較的成本が安価で、演算機能を持つ温度ロガーを用いることで、陽熱負荷量と土壌病原菌の死滅との関係を精測するための装置を開発する。さらに、陽熱負荷量には、土壌表面温度他、土壌深度のデータを必要とするため、表面温度から深度のデータを推定するモデル構築にも使用が可能である太陽熱土壌消毒判定装置の試作機の開発について報告する。

5.2 土壌病原菌の死滅条件の検討

過去に報告された文献(愛知県,2010:橋本ら,1980:家村,1986:石松ら,2013:伊達ら,1989:片山ら,2003:越智ら,2015:小玉ら,1979:小玉ら,1982:久保ら,2004:國安ら,1986:松尾ら,2014:永尾ら,2015:西,2014:小山田ら,2003:坂口ら,1982:塩見ら,1989:清水ら,1983:清水ら,1985:鈴木ら,1983:高見ら,2015:谷名ら,2009:山崎ら,2012-3)から、各土壌病原菌の死滅と関係がある温度閾値は変化し、また、温度閾値が変化すると、土壌病原菌が死滅するまでに蓄積する陽熱負荷量も変化する。そこで、本試作機において、今後の陽熱負荷量と土壌病原菌の死滅との関係を精測するため、温度閾値を35℃、40℃および45℃に、積算陽熱負荷量を800℃・hrs、1000℃・hrsおよび1200℃・hrsで設定でき、各種土壌病原菌に対応できる温度閾値の違いによる陽熱負荷量および積算温度を切り替えられる機能を設けた。

5.3 地温測定深度の検討

本研究対象地域における土壌病原菌は、鹿児島県農業開発センター熊毛支場、金峰支場および和歌山県農業総合試験場においても、エンドウ豆のエンドウ苗立枯症状病原菌 (*Fusarium oxysporum*) であり、この菌はフザリウムであるため生息深度は深度 0～25 cm である。本研究における土壌深度データは、生息深度の中間層である 15 cm とした。

5.4 試作機の構造

試作機の仕様を表 5.1 に、装置操作面の各部の名称を写真 5.1 に、装置内部の各部の名称を写真 5.2 に示した。また、装置の構造の中味のフローチャートを図 5.1 に示す。試作機で使用した温度測定制御装置は、8bitCPU の Arduino Uno (Arduino LLC) である。Arduino UNO は、世界的にも普及しており、様々なモジュールによって増設可能で、汎用性があるため、試作機開発における温度測定制御装置として選択した。地温測定プローブは、一般的に広く採用されているサーミスタ 103AT-11 (SEMITEC) を使用した。サーミスタセンサーは、発熱を起こし誤差を発生しやすいので、安定させるためにコネクター接続方式とした。本装置の測定データの保存はマイクロ SD に保存する方式を採用した。

装置操作面の各部において①の記録開始ボタンは地温測定を開始するためのボタンである。記録開始の押しボタンの状態が、(凸)の状態設定モードに切り替わり、(凹)で記録が開始される。②の LCD (ON / OFF) ボタンは、画面表示の ON と OFF の切り替えボタンである。LCD (ON / OFF) ボタンの押しボタンの状態が (凸) の時に

OFF となり、(凹)の時に ON となる。③の設定温度スイッチは、陽熱負荷量の設定温度を 35℃、40℃および 45℃の 3 点で設定できるスイッチである。設定温度スイッチの位置が、(A:上)の時 35℃に設定、(B:中)の時 40℃に設定および(C:下)の時 45℃に設定される。④の積算温度スイッチは、陽熱負荷量の積算値の閾値が設定できるスイッチである。すなわち各種病虫害の死滅温度を設定し、設定した閾値をもって太陽熱土壌消毒の完了を意味する。この積算温度スイッチの位置が、(A:上)の時 800℃に設定、(B:中)の時 1000℃に設定および(C:下)の時 1200℃に設定される。⑤は、電源スイッチである。電源スイッチの位置が、(上)の時電源が ON となり、(下)の時 OFF となる。⑥は、測定データ表示用 LCD である。⑦は、地温測定用プローブの差込口であり、⑧は、地温測定用プローブである。また、装置側面下部において外部電源 AC アダプター(DC12V)の差し込み口を設置した。外部電源が何らかにより突然電力を供給できなかった場合に内部電源に切り替わるための、非常時内部電源切り替え装置として 12V DC 小型パワーリレー(接点容量：5A 2 回路 C 接点)とコンデンサーを用いた自動切り替え装置を内蔵した。補助電源として単三電池(約 3000mA)6 本を内蔵できるようにした。補助電源の隣には、地温測定用プローブに乗ったノイズを除去するためのフェライトコアフィルターを取り付けた。

表 5.1 試作機の仕様

製品仕様	
動作電圧	DC6V
測定用プローブ(センサー(外付け))	サーミスタータイプ
測定チャンネル	1チャンネル(2チャンネル追加可能)
測定範囲	0~80℃
測定精度	±0.5℃
測定分解能	0.1℃
データ記録容量	※マイクロSDカードの容量に依存
記録間隔	30分間隔
記録モード	マイクロSDカード
アラーム機能	LCD(RGBバックライト)による色の切り替え方式
電源	外部電源(ACアダプター(12V)) 内部電源/補助電源(単3ニッケル水素電池×6本)
内部補助バッテリー稼働時間	約2日
本体動作環境	0~50℃(結露なきこと)
保存方式	テキストファイル
本体寸法	13.1(W)×9.75(H)×18.0(D)cm(突起部含まず)
本体質量	約840g(電池を含む)

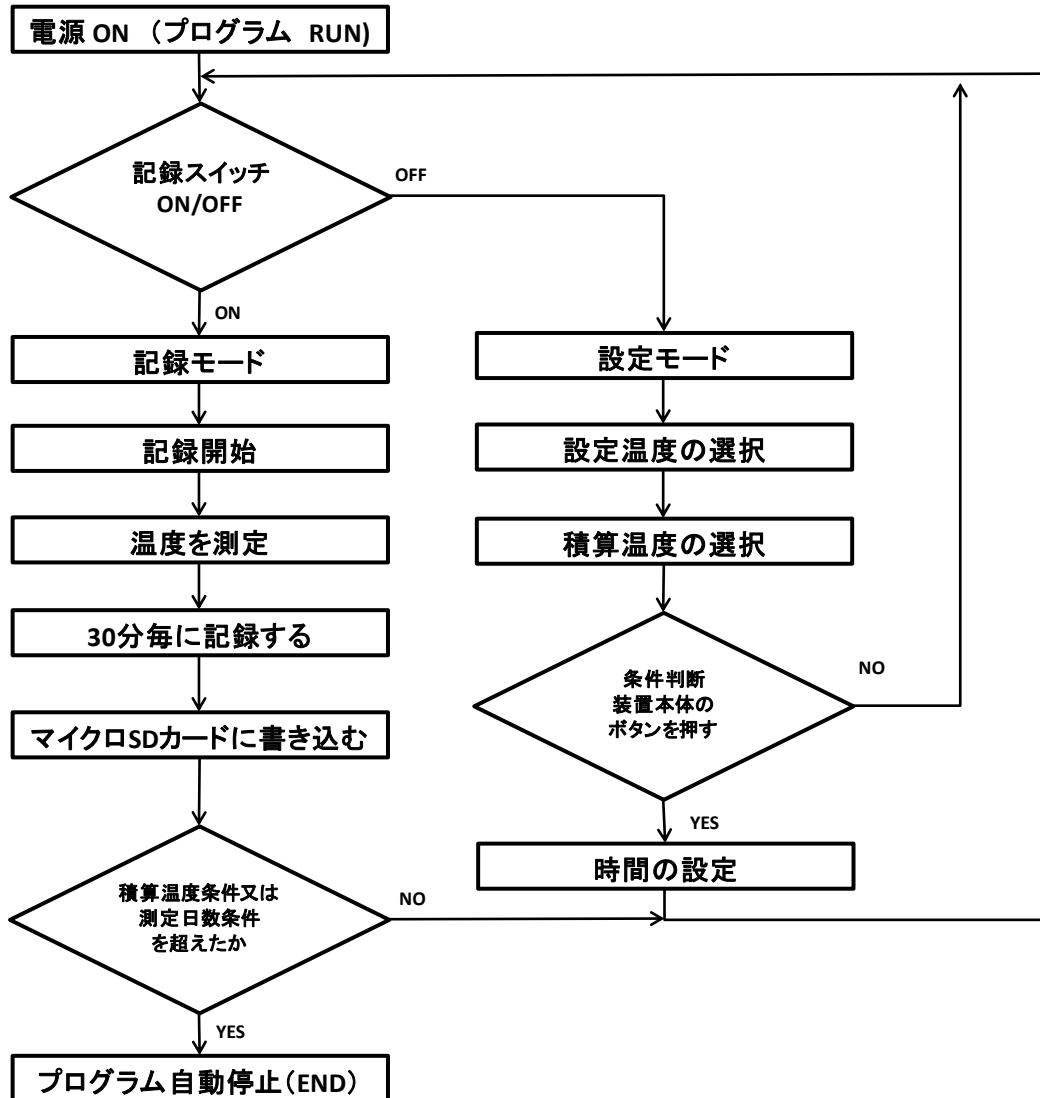


図 5.1 地温測定のプロチャート



写真 5.1 装置の操作面の各部の名称

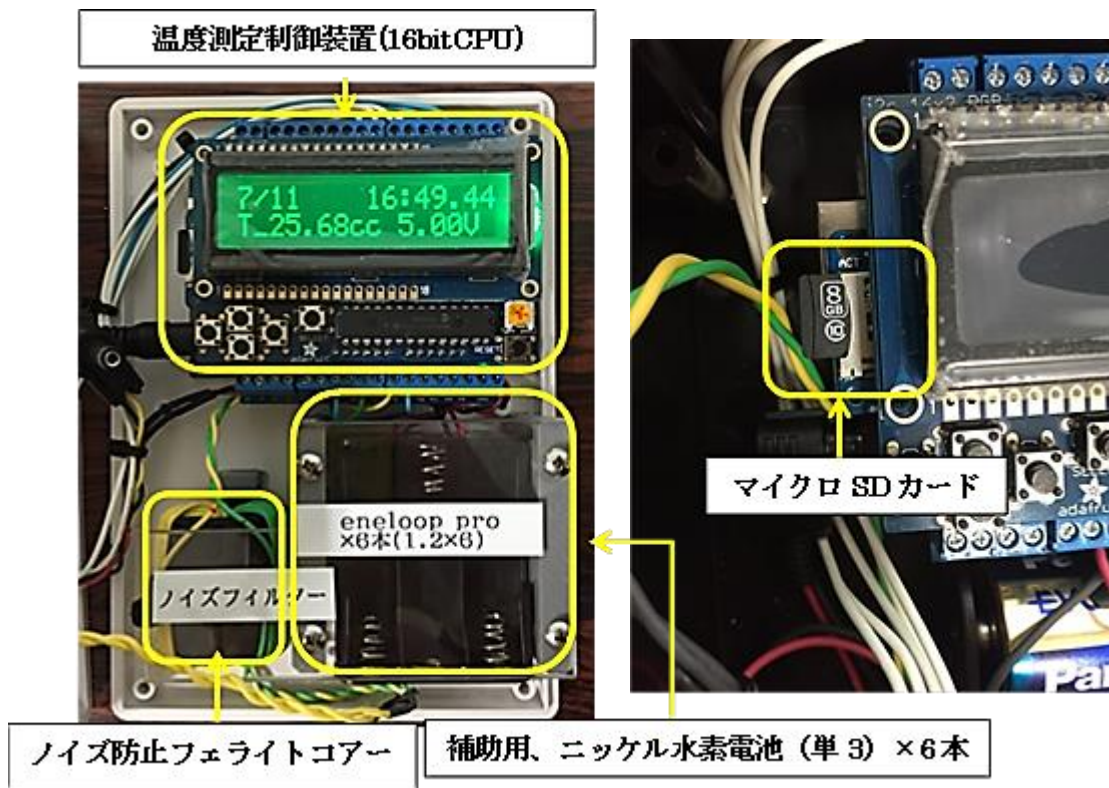


写真 5.2 装置内部の各部の名称

5.5 試作機の温度補正

試作機の温度補正方法は、試作機と標準温度計(測定範囲 0～50℃)の温度を比較することで行った。温度測定は、試作機および標準温度計の測定部の高さが同じになるように割りばしと輪ゴムで固定し、氷水に浸し、各温度を読み取り記録した。また、高温域に関しては同じ方法で、お湯に浸して、各温度域を読み取り記録した。以上の方法で求めた補正值を制御の中に組み込み、試作機の温度補正とした。

5.6 各試験所における試作機を用いた地温測定方法

実験場所は、鹿児島県西之表市に位置する鹿児島県農業開発総合センター熊毛支場、鹿児島県南さつま市金峰町に位置する鹿児島県農業開発総合センター金峰支場および和歌山県農業試験場の密閉ハウス圃場である。以下に各試験場における試作機を用いた地温測定方法を記載する。

(1)鹿児島県農業開発総合センター熊毛支場

鹿児島県農業開発総合センター熊毛支場での試作機の設置場所は、ビニールを被覆していないパイプハウスに設置した。設置方法は、試作機を発泡スチロールに入れ、表面を反射マルチで被覆し防水と温度上昇を回避するための処理を行った。さらに、発泡スチロール内部は水がたまらないように穴をあけ、コルクで試作機を持ち上げた。比較するために市販の温度記録装置おんどとり Jr. TR-52S(T&D社)も同じ箱内に設置した。両装置記録間隔は30分毎に設定した。測定位置は透明マルチで被覆した畝(マルチ床幅 50 cm、通路幅 50

cm)の中央、深さ 15 cm 位置にセンサー感部を設置した。測定期間は 2016 年 8 月 1 日 18 時から 8 月 15 日 9 時までであった。土壌病原菌の死滅温度の閾値は 40℃に設定し、積算陽熱負荷量を 1000℃・hrs に設定した。

(2)鹿児島県農業開発総合センター金峰支場

鹿児島県農業開発総合センター金峰支場での設置方法は、同試験場の熊毛支場と同じであるが、相違点としては、試作機は木製の箱に設置したことである。測定期間は、2016 年 8 月 4 日から 8 月 23 日であった。測定開始後から測定終了まで装置のスイッチ類は操作をしなかった。測定途中、他の場所で停電があったため、試作機を確認したが、画面表示は特に問題がなく作動していた。

(3)和歌山県農業試験場

和歌山県農業試験場での設置場所は、試験場内の 72 号密閉ハウス内で、試作機の装置全体が高温条件に晒されるため、耐久性も検討した。試作機を設置した期間は、2016 年 8 月 1 日 19 時 30 分から 8 月 17 日 18 時までの 16 日間であった。試作機の設置方法は、センサーを畝中央の地表面から深さ 15 cm に埋没し、30 分毎に測定を行った。比較として、同試験場内におんどとり RTR-502(T&D 社)のセンサー一部を畝中央の地表面から深さ 15 cm に埋没し地温の測定を行った。また、日射による装置の高温および表示部の劣化を防ぐため、両装置を反射シートで被覆した。土壌病原菌の死滅温度の閾値は 45℃に設定し、積算陽熱負荷量を 1000℃・hrs に設定した。

5.7 実験結果と考察

5.7.1 試作機とおんどとりとの地温特性の比較

鹿児島県農業開発センター熊毛支場での地温測定結果を図 5.2 に、鹿児島県農業開発総合センター金峰支場での地温測定結果を図 5.3 に、和歌山県農業試験場で試作機とおんどとりの地温測定結果を図 5.4 に示す。各試験圃場における試作機とおんどとりの温度変化は、ほぼ同じ傾向を示した。鹿児島県農業開発センター熊毛支場における温度測定期間の試作機とおんどとりの温度差の最大は、 1.1°C で、最小は -1.1°C であり、日最高地温と日最低地温時に出現した。期間全体の温度差の平均は -0.2°C であった。鹿児島県農業開発総合センター金峰支場における試作機とおんどとりとの差は、 $\pm 2^{\circ}\text{C}$ 未満であった。和歌山県農業試験場における試作機とおんどとりとの差は、 $\pm 0.85^{\circ}\text{C}$ であった。試作機の地温測定精度は、おんどとりと比べて、大きな差は確認されなかったため、温度記録ロガーとして使用可能であることが明確となった。

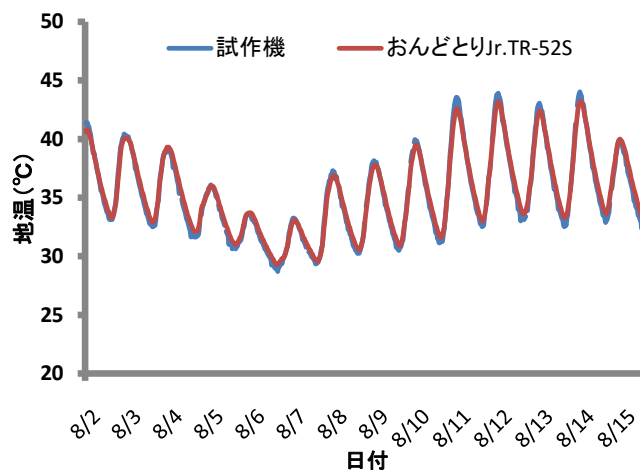


図 5.2 鹿児島県農業開発センター熊毛支場での
地温測定結果(2016年)

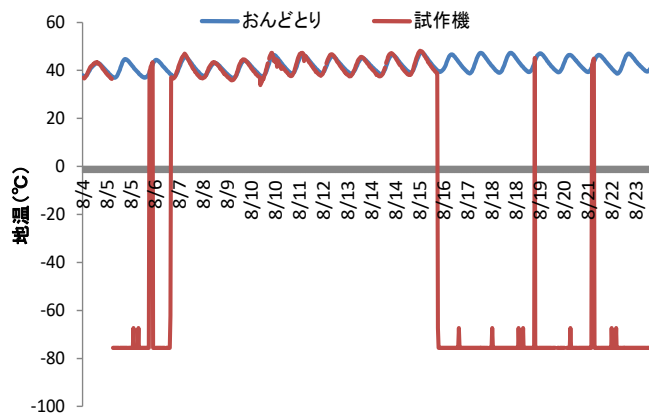


図 5.3 農業開発総合センター金峰支場での
地温測定結果(2016年)

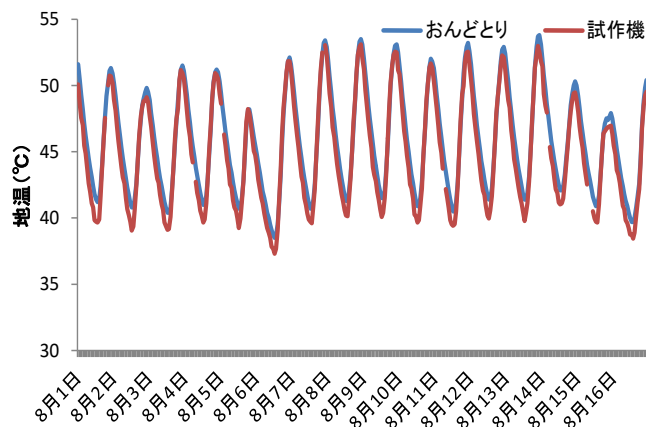


図 5.4 和歌山県農業試験場での地温測定(2016年)

5.7.2 試作機による陽熱負荷量の記録

鹿児島県農業開発センター金峰支場および和歌山県農業試験場の陽熱負荷量と日最高地温の測定結果を図 5.5 および図 5.6 に示す。鹿児島県農業開発センター金峰支場における日最高地温は、連続して 40℃以上に達し、陽熱負荷量が計算され、さらにその値が日毎に積算されていることが確認された。また、和歌山県農業試験場の設定した温度閾値は 45℃であるが、鹿児島県農業開発センター金峰支場の試作機と同様問題なく動作確認された。以上の結果から、陽熱負荷量が日毎に積算される制御により、消毒完了の判断できる装置の開発に成功した。また各温度閾値と各積算陽熱負荷量を自由に切り替えられる機能を有することで、各種土壌病原菌の消毒に対応できる装置であることが確認された。

本試験における積算陽熱負荷量は、12日間または15間の太陽熱土壌消毒法を実施したとしても設定した積算陽熱負荷量の 1000℃・hrs を超えることはなかった。ただし、和歌山県農業試験場においては、設定温度を 45℃に設定していたことで、より厳しい条件であったため設定した積算陽熱負荷量を越えなかったものと考察される。仮に 40℃設定にした場合は、陽熱負荷量も増加するため、1000℃・hrs を超えていた。しかし、本試験において各設置地点においても積算陽熱負荷量が設定値を越えなかったため、土壌病原菌の消毒との関係については検討できなかったため、今後の課題である。また、今回の和歌山県農業試験場のように、より厳しい条件においては、好条件化でも、消毒完了とならなかったため、より明確な温度閾値および対象土壌病原菌による陽熱負荷積算値の検討が必要である。

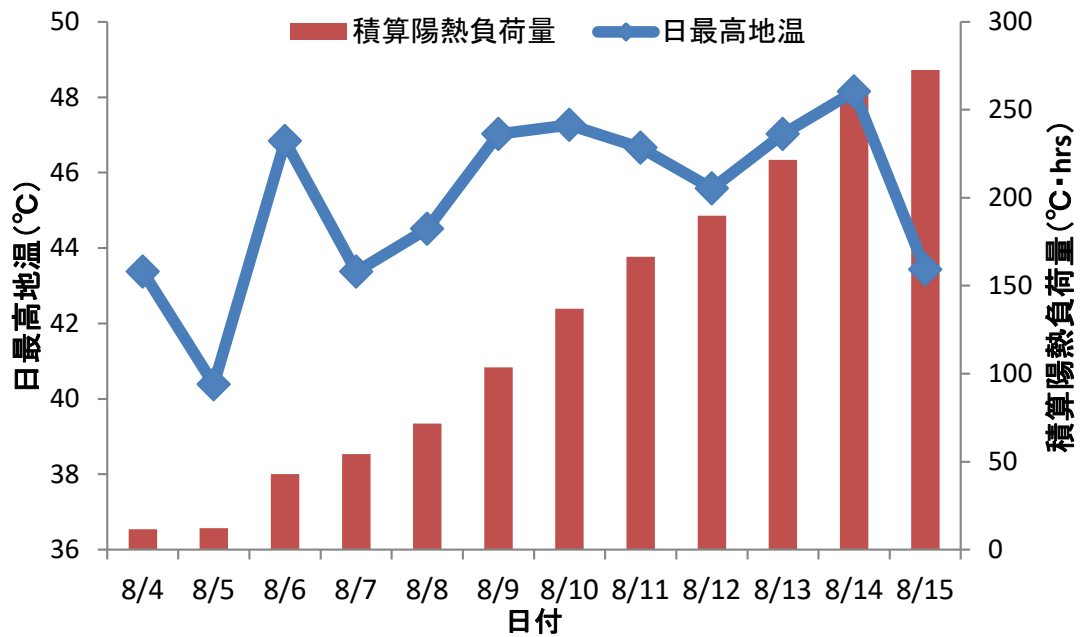


図 5.5 積算陽熱負荷量と最高地温の測定結果
(鹿児島県農業開発センター金峰支場)

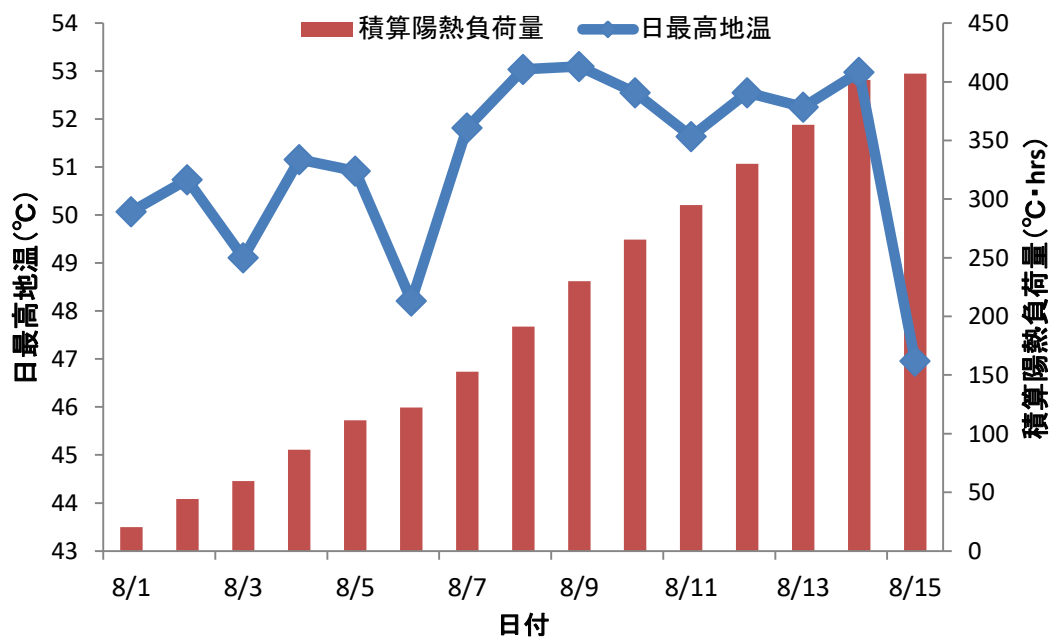


図 5.6 積算陽熱負荷量と最高地温の測定結果
(和歌山県農業試験場)

5.7.3 消毒完了の達成状況の検討

鹿児島県農業開発センター熊毛支場における試作機の地温測定において、測定期間の14日間の内6日間しか40℃を超えなかった。一方、同じようにビニールで被覆していないパイプハウスで試験した鹿児島県農業開発総合センター金峰支場では、消毒期間のほとんどが40℃を超える結果となった。他方で、密閉ハウスの条件で試験した和歌山県農業試験場においては、日最高地温が50℃を超えており、ハウスにおけるビニールの被覆の有無により日最高地温が約10℃の差があった。このように、密閉ハウスの有無や土壌の条件等により、土壌病原菌の死滅温度閾値を超える日数が少なくなる可能性がある。本試験における鹿児島県農業開発センター熊毛支場の温度閾値は40℃と設定していたため、消毒期間中において積算陽熱負荷量の値が、設定した1000℃・hrsに達しなかった場合、消毒されていないと判断される。しかし、実際の地温測定において土壌病原菌の死滅条件に達している期間も存在することから、完全には消毒されていないものの、若干は消毒されていると判断できる。すなわち、土壌病原菌の死滅に関する積算陽熱負荷量の閾値まで達しない可能性のある条件において、土壌消毒の達成状況を確認できるようにすれば、その達成状況により、農家がより綿密な栽培計画を立てることが可能であるため、今後の課題として、消毒の達成状況を確認するための改良が必要であることが示唆された。

5.7.4 試作機における使用時の問題

試作機の使用時において、鹿児島県農業開発センター熊毛支場における測定期間の中で16点のデータ欠損が確認された。データ欠

損は、測定期間中にランダムに出現し、さらに、8月6日11時にデータが一度リセットされる問題も発生した。鹿児島県農業開発総合センター金峰支場の欠損データは測定期間内で41点であり、-75.59の表示が約12日間で確認された。和歌山県農業試験場においてもデータ欠損が確認された。測定期間中の欠損データは16データであり、全体の約2%の欠損であった。これら、データ欠損における問題については、ハード的要因が推察される。

1つ目は、マイクロSDの個体差、特に高速書き込み時におけるリード・ライトのばらつきが大きな問題である。高速書き込み時にエラーを起こした可能性があり、エラー発生時においてリライト(再書き込み)のハードウェアの特性におけるエラー回避のルーチンが不十分であったためタイムラグにおけるデータ欠損が発生したものと考察される。

2つ目は、システムを構成しているハードウェアの処理時間においてサンプリングタイムの安定を図るため設定していた0.7secの遅延部分を検証したところ、タイマー機能を持つRTC(リアルタイムクロック)の遅延によって、ハードウェアの時間軸のずれが予想以上に大きいことで発生したデータ欠損と考察される。また、データがリセットされる問題については、内部変数のカウンターの初期化が正常でなかったため、エンドルーチンに入り込みハードウェアの作動限界に達したことが、システムダウンの原因になったと推察される。他の原因としては、ハードウェア的な電源供給の不要、または、天候による落雷により発生した大波電流がシステムの不安定を招いた可能性もある。これらのデータの記録の欠損および不用意なシステムダウンについては今後の課題である。

試作機の装置全体が高温条件に晒される条件では、装置本体の基盤は、システム自体の停止など不具合を生じ、最悪の場合装置本体が故障する可能性があるため、耐久性において検討した結果、密閉ハウス内で温度測定を行った和歌山県農業試験場において、試作機を設置したハウス内の温度環境は、 30.4°C ～ 64.4°C の範囲で高温にもかかわらず、測定期間中に機械の作動の不具合は確認されなかった。したがって、設置する温度環境が 60°C 程度であれば、システムの停止などの不具合を生じないことが確認された。

試作機の内部時間の設定時において、本装置を開閉するため、内部配線が引っ張られやすく配線の接触不良の問題を引き起こすことが懸念された。また、本試験においては、試作機の電源をAC電源にしたが、営農現場では、AC電源を兼ね備えていない施設が多いため、内臓バッテリーのみで稼働するように改良が必要である。以上の結果から、営農現場に導入するためには、使用する場所の環境影響、装置の簡略化および小型化、導入しやすいコストなどを検討する必要がある。

5.8 まとめ

本研究は、誰でも太陽熱土壌消毒完了の判断ができる装置を開発するための初動として、陽熱負荷量の概念を組み込んだ太陽熱土壌消毒判定装置の試作機を開発した。

本研究における試作機の成功は、下記の4つである。

- 1) 地温の測定ができたこと。
- 2) 土壌病原菌の死滅温度を選択することが可能であること。
- 3) 毎日の陽熱負荷量が積算されたこと。

4) 土壌病原菌の種類により積算陽熱負荷量が自由に選択できること。

以上のことが確認されたため、本研究の目的である陽熱負荷量の概念を組み込んだ装置を開発できた。

本研究における課題点は、下記の6つである。

- 1) 営農現場で利用するためには、露地やハウス等を想定して、防水性および堅牢性等の改良が必要であること。
- 2) 営農現場に導入するためには、電源設備が完備されていないことを前提に、バッテリーのみで稼働すること。
- 3) 温度閾値および対象菌による陽熱負荷積算値の検討が必要であること。
- 4) 消毒の達成状況を確認できるようにすること。
- 5) 装置の簡略化および小型化を検討すること。
- 6) 圃場に導入できるようなコストにすること。

第 6 章 総括

太陽熱土壌消毒法の効果は、これまでの土壌病害虫の研究者により恒温装置を用いた室内培養実験において、ある一定温度以上の処理時間で病原菌の死滅を判定しており、露地実験においても地温が一定温度以上に達した経過時間の積算表示で示されている。

実際の圃場での研究成果ではあるが、特定温度以上の経過時間に注目しており、その温度以上での温度変化を考慮していないので、同じ経過時間であっても温度変化の状況によって消毒効果に違いが現れることもある。そのため、土壌病原菌の消毒効果は、現場の農業従事者の判断に委ねられることになり、太陽熱土壌消毒法の普及と利用はあまり進んでいない。

本研究では、太陽熱土壌消毒法における現場での消毒効果を明確化する一つの手法として、土壌に蓄積される熱量を陽熱負荷量と定義し、日最高地温から近似モデルを構築し、土壌病原菌の消毒との関係について検討した。さらに、太陽熱土壌消毒判定装置の試作機を作成した。研究の成果は以下のように総括される。

I : 太陽放射エネルギーと土壌面の熱収支

- 1) 地温上昇に及ぼす熱源である太陽放射の成分で直達放射が散乱放射よりも大きく影響していることが示唆された。
- 2) 各波長帯におけるエネルギー密度は、短い波長帯の方が長い波長帯よりも高いことが示唆され、地温上昇に影響を及ぼすことが推察された。
- 3) 太陽熱土壌消毒法の地温の上昇に影響を及ぼす要因としては、

土壌内部の物理的条件の他に、密閉ハウスや透明マルチなどの潜熱による熱損失を低減する条件であることが示唆された。

II：日陽熱負荷量のモデル化

現場での太陽熱消毒法への適用を想定して、土壌病原菌の消毒効果を定量的に判断する尺度として陽熱負荷量 (SHLA) を定義した。また、消毒期間内の一日ごとの陽熱負荷量 (日陽熱負荷量 (SHLA_d)) を近似するモデルを次式のように構築した。

$$SHLA_d \cong K \cdot (1.4876 + 0.0454 \times D_r) \Delta T^{1.4970 + 0.0086 \times D_r}$$

ここで、 K は土壌環境補正係数と呼ばれ、土壌の環境によって設定される定数であり、本論では土壌環境補正係数の値の範囲は 0.85 ~ 2.61 の範囲になっている。 D_r は土壌中の深度 [cm] を意味する。また、 ΔT は次式で設定される土壌中の熱負荷 [°C] である。

$$\Delta T = \max(\text{最高地温} - T_c, 0) \cdot \cdot \cdot (3.12)$$

ここで、 T_c は土壌病原菌に対して定まる負荷基準温度 [°C] である。本論では、この負荷基準温度を先行研究の土壌病原菌の死滅条件を参考に $T_c = 40^\circ\text{C}$ と設定した。

III：日陽熱負荷量と土壌病原菌の消毒との関係

- 1) 本研究においては、太陽熱土壌消毒にける馬鈴薯そうか病菌の消毒に対する日陽熱負荷量の積算値の目安は、深度 5cm で負荷基準温度が 40°C の条件において 688.0°C・hrs 以上であることが明らかとなった。
- 2) 本研究においては、太陽熱土壌消毒にけるトマト立枯病菌の消毒に対する日陽熱負荷量の積算値の目安は、深度 5cm で負

荷基準温度が 40℃ の条件において 2896.0℃・hrs 以上であり、深度 15 cm の時、1117.8℃・hrs 以上であることが明らかとなった。

- 3) 文献調査の結果から恒温処理実験においては、低熱負荷領域菌体の熱負荷量は、100℃・hrs 以下で、中熱負荷領域菌体は、200~300℃・hrs 未満の範囲で、高熱負荷領域菌体は、300℃・hrs 以上で死滅することが示唆された。

IV : 太陽熱消毒判定装置の試作機の作成

- 1) 太陽熱土壌消毒の効果を判断するための装置は試作機を比較的安価で開発ができたが、商用電源が必要な点に問題が残った。
- 2) 本装置を用いることで、地温や土壌の陽熱負荷量積算値が求められ、太陽熱土壌消毒効果の目安として判断することが可能となり、土壌病原菌の消毒判定に使用が可能であることが明らかとなった。
- 3) 問題点は、圃場条件下での検証試験により、装置の簡略化、消毒の達成状況の指示標方法、耐熱性・ロガーの耐久性・防水性および低消費電力等の課題が抽出され、今後の機器開発の問題としてさらなる改良をする予定である。

V : 今後の展望

太陽熱土壌消毒法の消毒期間の判定は陽熱負荷量を導入することで従来のものに比べて明確化され、消毒効果の確認が出来、実用的利用が可能になる。さらに、以下の利点が考えられる。

- 1) 陽熱負荷量の近似モデルは、アメダスデータから日最高地温の

推定ができれば、農研機構が公開している農業気象メッシュデータを利用した全国地域の太陽熱土壌消毒法の適地性や消毒期間の判定が可能となる。

- 2) 太陽熱土壌消毒判定装置は、太陽熱土壌消毒法の消毒期間の判定を誰でも容易に可能とし、農家の作物栽培計画を立てやすくなり、コストが低減されるという利点を有している。
- 3) 太陽熱土壌消毒判定装置が市販化されることで、太陽熱土壌消毒法が普及拡大され、化学農薬に頼らない持続的な環境保全技術につながり、地球環境にやさしい農法の一つになる。

謝 辞

本研究を遂行するにあたり、終始御親切な御指導ならびに御鞭撻を賜りました長崎総合科学大学大学院工学研究科 大場和彦教授に深甚なる謝意を表します。

本研究の論文をまとめるにあたり、モデルの基本的な考え方をはじめ、研究の進め方や研究の課題に対し具体的なご指導、そして暖かく多大なご支援をいただきました長崎総合科学大学大学院工学研究科 日當明男教授と研究成果をとりまとめるに至って、入念な御校閲とご指導を賜り、時には厳しく、そして暖かく多大なご支援をいただきました鹿児島大学農学部紙谷喜則准教授に心より感謝申し上げます。

本研究における太陽熱土壌消毒判定装置の試作機作成に当たり、制御の基礎や考え方を初歩から丁寧に指導してくださいました長崎総合科学大学大学院新技術創成研究所の客員研究員 薄田篤生氏に心より感謝申し上げます。

本研究における現地データの提供ならびに現地実験に関して、多大なご協力とご支援をいただきました中央農業研究センター橋本知義グループリーダーをはじめ、和歌山県農業試験場、長崎県農林技術開発センター馬鈴薯研究室、宮崎県農業試験場、中央農業研究センター、鹿児島県農業開発センター熊毛支場ならびに金峰支場の皆様方にここに謹んで感謝申し上げます。

学会等の投稿論文の英文検閲については、長崎総合科学大学環境・建築学部人間環境学科 ブライアン・F. バークガフニ教授には大変お世話になりました。ここに感謝申し上げます。

本研究の遂行にあたり、種々の御協力を賜りました長崎総合科学
大学情報学部の皆様に深く感謝致します。本研究で得られた様々な
実験結果においても、多くの方々の御協力、御尽力無しで取得しえ
ないものであることを痛感致しております。ここにご紹介できな
かった方々も含め、皆様の御協力、御支援により本研究が遂行いたし
ましたことを心から感謝申し上げます。

最後になりましたが、父である下高修二ならびに母の下高喜代美
には、長崎総合科学大学大学院工学研究科 博士課程の支援を頂き
ました。また、如何なる時も私の心の支えとなり、激励をください
ましたことを深く感謝申し上げます。

これまで携わっていただきました皆様に改めてここにお礼を述べ
謝辞と致します。

参考文献

- 1) Abraham Gamliel and Jaacov Katan ed.: Soil Solarization -Theory and Practice-, APS Press, 1-266, 2012.
- 2) 愛知県：キュウリホモプシス根腐病 (Phomopsis sclerotiodes Kesteren), 平成 22 年度病虫害発生予察特殊報第 4 号. 2010.
- 3) AL-Karaghool, A. A., and Al-Kayssi, A. W.: Influence of soil moisture content on soil solarization efficiency, Renewable Energy, 24 Issue 1, 131-144, 2001.
- 4) 新村昭憲, 坂本宣崇, 阿部秀夫: 還元消毒法によるネギ根腐れ萎ちょう病の防除, 日植病報, 65(3), 352-353, 1999.
- 5) Carlene A. C., Thomas R. S. and Salvadore J. L.: Effects of soil temperature and tuber depth on Cyperus spp. Control. *Weed Science*, 47, 467-472, 1999.
- 6) C. J. Lopez-Herrera., B. Verdu-Valiente., J. M. Melero-Vara.: Eradication of primary inoculum of Botrytis cinerea by soil solarization, *Plant Disease*, Vol.78(6), 594-597, 1994.
- 7) 土壌物理研究会編: 土壌の物理性と植物生育, 36-51, 養賢堂出版, 1979.
- 8) 江種伸之, 加瀬広大, 山本秀一, 増田吉彦, 平田健正: 太陽熱を利用した農地消毒時の土中温度の変化特性, 土木学会論文集 B, 64(4), 267-279, 2008.
- 9) 萩森 学, 尾島一史, 長坂幸吉, 安部順一郎, 亀野貞: 太陽熱利用土壌消毒とネットトンネルおよび BT 剤を組み合わせたアブ

ラナ科野菜の環境保全型露地栽培体系，近畿中国四国農業研究センター研究報告，第6号，113-123，2007.

- 10) 橋本光司，渋川三郎：生物検定によるナス半身萎ちょう病菌の死滅温度，関東東山病害虫研究会年報，第27集，43-44，1980.
- 11) M Horowitz., Y Regev. and G Herzlinger.: Solarization for Weed Control. *Weed Science*, 31, 170-179, 1999.
- 12) 福井俊男，小玉孝司，中西喜徳：太陽熱とハウス密閉処理による土壌消毒法についてⅣ露地型被覆処理による土壌伝染性病害虫に対する適用拡大.奈良県農業試験場研究報告，12号，109-119，1981
- 13) I.A.Shulgin.: 植物と太陽 [内島善兵衛訳]，エネルギー関連文献翻訳シリーズ2，農林水産技術会議事務局，1973
- 14) 伊達寛敬，那須英夫，畑本 求：各種条件下においた青枯病菌の死滅温度と時間について，日本植物病理学会報，第55巻，第1号，p104，1989.
- 15) 家村浩海：太陽熱利用による露地野菜の土壌病害防除技術，農業技術，41(12)，529-532，1986.
- 16) 石松敏樹，岡本潤，後藤英世：大分方式高設栽培における太陽熱消毒によるイチゴ萎黄病の防除対策，大分県農林水産研究指導センター研究報告(農業研究部編)，第3号，9-18，2013
- 17) J. Katan, A. Greenberger, H. Alen and A. Grinstein.: Solar heating by polyethylene mulching for the control of diseases caused by soil-borne pathogens, *Phytopathology*, Vol.66, 683-688, 1976.
- 18) 片山勝之，皆川 望，三浦憲蔵：透明ポリフィルムの土壌表面被

覆による太陽熱処理の雑草防除効果.中央農業総合研究センター
研究報告, 3, 81-87, 2003.

- 19) 木村真人: 土壌中の部生物とその働き(その9), 業土木学会誌,
第59巻, 第12号, 49-57, 1991.
- 20) 小玉孝司, 福井俊男: 太陽熱とハウス密閉処理による土壌消毒
法について I 土壌伝染性病原菌の死滅条件の設定とハウス密閉
処理による土壌温度の変化, 奈良県農業試験場研究報告, 10,
71-82, 1979a.
- 21) 小玉孝司, 福井俊男, 中西喜徳: 太陽熱とハウス密閉処理による
土壌消毒法について II イチゴ萎黄病ほか土壌伝染性病害に対す
る土壌消毒効果と効果判定基準の設定.奈良県農業試験場研究報
告, 10, 83-92, 1979b.
- 22) 小玉孝司, 福井俊男: イチゴ萎黄病に対する露地型太陽熱土壌
消毒法の適用, 日植病報, 48, 699-701, 1982.
- 23) 越智直, 櫛間義幸, 井原啓貴, 中川晃生, 寺本敏, 橋本知義: 太
陽熱土壌消毒による *Haematonectria ipomoeae* の密度低減効果.
関東東山病害虫研究会報, 第62集, 9-12, 2015.
- 24) 小山田浩一, 鈴木聡, 和田悦郎, 齋藤芳彦: 土壌還元消毒法のイ
チゴ萎黄病に対する防除効果, 関東東山病害虫研究会報, 第50
集, 49-53, 2003.
- 25) 久保周子, 片瀬雅彦, 清水喜一, 加藤浩生, 竹内妙子: トマト土
壌病害虫に対する土壌還元消毒の効果.千葉農総研研報, 3,
95-104, 2004.
- 26) 熊倉裕史, 長坂幸吉, 藤原隆広, 吉田祐子: 初冬どりハクサイで
の防虫ネットトンネルと太陽熱処理の併用による虫害抑制, 近
畿中国四国農業研究センター研究報告, 第4号, 1-14, 2005.

- 27) 國安克人, 竹内昭士郎: 熱水注入による土壤消毒のトマト萎ちよう病に対する防除効果, 野菜試験報, A.14, 141-148, 1986.
- 28) M. Porrás, C. Barrán, et al: Reduction of *Phytophthora cactorum* in Strawberry fields by *Trichoderma* spp and soil solarization, *Plant Disease*, Vol.91 (2), 142-145, 2007.
- 29) 松尾祐輝, 森一幸, 坂本悠, 渡邊亘, 中尾敬: II-3-2 ジャガイモそうか病抵抗性検定試験, 長崎県, 82-85, 2014.
- 30) Maria G. Corradini, Mark D. Normand and Micha Peleg.: Stochastic and deterministic model of microbial heat inactivation. *J. Food Science*, Vol.75, R59-R70, 2010.
- 31) Mihail J.D.: Effect of soil solarization on *Macrophomina phaseolina* and *Sclerotium rolfsii*, *Plant Disease*, Vol.68 (2), 156-159, 1984.
- 32) 皆川望, 片山勝之, 三浦憲蔵: 太陽熱処理を想定した土壤の加温処理による線虫密度低減効果, 日本線虫学会誌, 29(1), 48, 1990.
- 33) 長井雄次, 深津量栄: スイカの CGMMV に対する臭化メチルおよび蒸気による土壤消毒効果. 関東病中研究報, 17, 53-54, 1970.
- 34) 中村靖弘, 片瀬雅彦, 久保周子: 深層地中加温と太陽熱併用による土壤消毒法の確立第 1 報土壤消毒時の地温と消毒効果. 千葉農総研研報, 3, 113-120, 2004.
- 35) 永尾亜珠沙, 渡邊亘, 尾崎哲郎, 茶谷正孝, 小川哲治, 中尾敬: 畝立て陽熱消毒はジャガイモそうか病菌の死滅に有効な地温を確保できる, 平成 25 年長崎県成果情報, 2015.
- 36) 日本リモートセンシング研究会編, 改訂版図解リモートセンシング, 社団法人 日本測量協会, 1 章 p1-11, 3 章 p1-8, 2003.

- 37) 西八束：鹿児島県にけるジャガイモそうか病の原因菌と防除に関する研究.博士論文要約,鹿児島大学連合農学研究科学位論文, 1-4, 2014.
- 38) 農林総合研究センター,北総園芸研究所,畑作園芸研究室:サツマイモつる割病及び立枯病の太陽熱消毒による防除効果の解明.試験研究成果普及情報,2008.
- 39) 大場和彦,鈴木義則,黒瀬義孝:九州・沖縄地域における干ばつの農業気象学的解析 特に1994年の干ばつと歴史について,九州農業試験場研究資料,86号,93,1999.
- 40) Pullman G.S., DeVay J.E., and Garber R.H.: Soil solarization and thermal death: A Logarithmic relation between time and temperature for four soilborne plant pathogens, *Phytopathology*, Vol.71 (9), 959-964, 1981
- 41) Robert V.Bega and Richard S.Smith.: Time-Temperature Relationships in Thermal Inactivation of Sclerotia of *Macrophomina phaseoli*, *Phytopathology*, Vol.52, 632-635, 1962.
- 42) 載燕燕,伊藤健吾,千家正照:太陽熱消毒法による土壌病害虫の防除の検討,平成25年度農業農村工学会大会講演会講演要旨集, 3-18, 2013.
- 43) 坂口荘一,豊村順,松原德行:夏季・ほ場のビニール被覆によるジャガイモそうか病ならびに青枯病発生防止効果,九州病害虫研究会報,Vol.28, 34-36, 1982.
- 44) 清水寛二,鈴木良治,川田 和:太陽熱利用による露地野菜の土壌病害防除に関する研究(2)カブ根こぶ病菌の死滅温度, *Ann.Phytopath.Soc.Japan*, 49(1), 101, 1983.

- 45) 清水寛二, 鈴木良治, 川田和: 太陽熱利用による露地野菜の土壌病害防除に関する研究(8) ダイコン萎黄病菌の死滅温度, 日本植物病理学会報, 第51巻, 第1号, 76, 1985
- 46) 下高敏彰, 小川さつき, 篠原陽子, 菱池政志, 渡邊亘, 橋本知義, 大場和彦: 土壌の太陽熱消毒法の効果を示す陽熱負荷指数のモデル化, 生物と気象, 16巻, 86-93, 2016
- 47) 塩見敏樹, 竹内昭士郎: メロン毛根病菌の生存に関与する2,3の要因, 日本植物病理学会報, 第55巻, 第1号, 野菜茶試, 104, 1989
- 48) 白木己蔵: 臭化メチルに頼らないハウスの新しい太陽熱処理法. 農文協, 東京, 1-135pp, 1999.
- 49) 杉村和美, 阿万暢彦: ネコブセンチュウの耐熱性の検討, 研究成果カード, 宮崎県総合農業試験場, 2001.
- 50) 鈴木良治, 清水寛二, 川田和: 太陽熱利用による露地野菜の土壌病害防除(4)変温処理による各土壌病原菌の有効死滅温度. 関西病虫害研究会報, 25号, 49, 1983.
- 51) 高倉直: 太陽熱利用による土壌消毒について.九州の農業気象, II輯7号, 49-50, 1998.
- 52) 高野幸成, 猪野誠: サツマイモ育苗ハウスにおける太陽熱消毒及び土壌還元消毒による立枯病の防除効果, 千葉農林総研, 7, 33-39, 2015.
- 53) 竹原利明, 國安克人: nit変異菌株を用いたフザリウム病の発生生態の解明 II. *Fusarium oxysporum* の nit変異菌株の選択分離培地を用いた分離, 日植病報, 60, 705-701, 1994.
- 54) 竹内繁治, 川田洋一: 蒸気土壌消毒時の地温上昇に影響を及ぼす土壌条件, 四国植防, 第41号, 25-31, 2006.
- 55) 竹内妙子, 福田寛: 熱水土壌消毒によるトマト青枯病・褐色根腐病およびサツマイモネコブセンチュウ防除, 千葉農試研報,

34,85-90, 1993.

- 56) 田中哲司, 市川耕治, 松崎聖史, 酒井広蔵: 深層地中加温と太陽熱の併用処理が地温・ネコブセンチュウ及び青枯病菌に及ぼす影響, 愛知県農業総合試験場研究報告, 第32号, 105-110, 2000.
- 57) 谷名光治, 桐野菜美子, 末永寛子: 高設栽培連用培地のイチゴ炭疽病防除における太陽熱消毒の目安, 近畿中国四国農業研究成果情報, 2010巻, 2011.
- 58) 田代暢哉, 山本平三, 松尾良満: ジャガイモそうか病の発病経過と灌水による防除, 九州病害虫研究会報, Vol.28, 36-40, 1982.
- 59) 上原洋一, 野々山芳夫: トマト青枯病の生態的防除法(第3報)遮根化学繊維布の作土敷設と太陽熱消毒による防除, 土肥要旨集, 第34集, 38, 1988.
- 60) 内嶋善兵衛, 桜谷哲夫, 奥山富子: 関東地方南部の日射機構. 農技研報, A27,91-145, 1981.
- 61) 内嶋善兵衛: 宮崎県の園芸ハウス暖房と乳牛暑熱ストレスへの気候温暖化の影響評価, 九州の農業気象, II輯 14号, 32-35, 2011.
- 62) 和歌山県農業試験場編(総合助成試験中核研究成果): 太陽熱利用による水田転換畑露地野菜の土壌病害防除技術確立, 和歌山県農業試験場刊, 和歌山市, 1-147, 1985.
- 63) Wu, Y., Perry, K.B. and Ristains, J.B.: Estimating temperature of mulched and bare soil from meteorological data, *Agricultural and Forest Meteorology*, 81 Issues3-4, 299-323, 1996.
- 64) 山崎睦子, 矢野和孝, 森田泰彰, 竹内繁治: ショウガ疫病菌の発

生生態と防除法，高知農技セ研報，21号，7-16，2012-3.

- 65) Yarwood, C. E.: Temperature Coefficients in Plant Pathology, *Phytopathology*, Vol.65, 1198-1201, 1975.
- 66) Ytzhaq Mahrer and Jaacov Katan.: Spatial soil temperature regime under transparent polyethylene mulch numerical and experimental studies, *Soil Science*, Vol.131, No.2, 82-87, 1981.
- 67) Ytzhaq Mahrer.: Prediction of soil temperatures of a soil mulched with transparent polyethylene, *J. Applied Meteorol.*, Vol.18, 1263-1267, 1979.