

太陽熱土壤消毒を模した実験系による温熱処理が 可給態リン酸の動態に及ぼす影響

杉戸智子¹⁾, 君和田健二¹⁾, 岡 紀邦¹⁾, 橋本知義²⁾

摘 要

太陽熱土壤消毒は薬剤を使わずに太陽熱を利用して地温を高めることにより土壤病害を防除する技術である。施肥後に太陽熱土壤消毒を行う畝立後消毒体系では養分の動態が土壤消毒中の高温の影響を受けると考えられる。そこで太陽熱土壤消毒を模した培養実験系において、45°Cで3週間の培養処理（以下、温熱処理）が土壤の可給態リン酸の変化に及ぼす影響を解析した。

温熱処理による可給態リン酸量の変化は給源によって異なった。肥料由来の可給態リン酸量は、リン酸の原料として有機質資材を含む有機配合肥料及び有機質肥料では温熱処理によって有意に増加した。一方、リン酸肥料及び牛ふんオガクズ堆肥由来の可給態リン酸量は温熱処理の影響をほとんど受けなかった。また、土壤由来の可給態リン酸量は温熱処理で有意に増加したがその増加量は小さかった。土壤バイオマスリン酸は温熱処理により減少したが、この減少に由来する土壤中の可給態リン酸の増加は判然としなかった。

温熱処理後の肥料及び堆肥由来の10aあたりの可給態リン酸量の増加を推定した結果、牛ふんオガクズ堆肥（現物で2t/10a施用）では過リン酸石灰10kgP₂O₅、ハイパーCDU入り有機配合肥料（商品名：ハイパーCDU入り豆用配合肥料、現物で300kg/10a施用）では過リン酸石灰20kgP₂O₅、有機質肥料（商品名：デルプラス、現物で250kg/10a施用）では過リン酸石灰20kgP₂O₅以上に相当した。

以上より、太陽熱土壤消毒を模した培養実験により肥料や堆肥から供給される可給態リン酸量を評価することで、畝立後消毒体系における適切なリン酸施肥量の推定が可能になることが示された。

キーワード：太陽熱土壤消毒，土壤培養試験，可給態リン酸，有機質肥料

I. 緒 言

施設栽培では連作が多いことから土壤病害が発生しやすく、土壤消毒が不可欠な技術となっている。しかし、土壤くん蒸剤施用の作業上の負担や食の安全・安心の観点から、さらにオゾン層破壊物質として指定された土壤くん蒸剤臭化メチルの全廃に向けて制定された「不可欠用途臭化メチル全廃に向けた国家管理戦略」（阿部，2012）に基づいて、代替技術の開発・普及が求められている。

太陽熱土壤消毒は作物を栽培しない夏場に施設内の土壤表面にマルチやビニールを張り、日最高地温を50～60°Cまで高めることで土壤中の病害菌を死滅させる技術である（岡山，1999）。

通常は太陽熱土壤消毒後に耕起・施肥を行うが、ハウスの端で十分に地温が上がらず、病原菌の死滅が不十分であった場合には太陽熱土壤消毒後の耕起による病原菌の再汚染が懸念されることから、太陽熱土壤消毒前に施肥・耕起・畝立てを行う作業体系（以下、畝立後消毒体系）が提案されている（白木，1999）。一方で、施肥・有機物施用後に太陽熱土壤消毒を行うため、高地温の影響を受けて肥料の溶出が進むことで、栽培期間中の養分供給パターンが太陽熱土壤消毒後に施肥した場合と異なる、あるいは肥効が不安定になると想定される。

これまでに、和歌山県の実エンドウ栽培では、畝立後消毒体系で窒素肥料として高温の影響を受けずに緩効的に窒素が溶出する微生物分解型緩効性窒素肥料「ハイパーCDU」を用いることで、畝立後消毒体系においても生育後半に窒素の供給を可能とする

と共に追肥作業を省略できる栽培法を提案している(橋本, 2013)。しかし, 畝立後消毒体系での土壌中の可給態リン酸の変化や, 施用したリン酸肥料, 有機配合肥料や有機質肥料及び堆肥中のリン酸の肥効がどのように変化するかについては検討されていない。

そこで, 畝立後消毒体系で太陽熱土壌消毒を行った場合に土壌や肥料, 堆肥から供給される可給態リン酸の変化を明らかにするために, 畝立後消毒体系の普及が見込まれる和歌山県及び宮崎県の施設栽培を対象として, 太陽熱土壌消毒及びその後の作物栽培期間を模した室内培養試験で解析した。

II. 材料・方法

1. 太陽熱土壌消毒前後及び再培養前後の土壌, 肥料及び堆肥由来の可給態リン酸量の推定

1) 室内培養試験

対象とした和歌山県の実エンドウ, 宮崎県のトマトの施設栽培が行われている地域はいずれも以前は水田として利用していた地域であること, 太陽熱土壌消毒による可給態リン酸量の変化量は少ないことが当初予想されたことから, その変化を把握するために可給態(トルオーグ)リン酸の低い土壌として水田土壌を供試した。和歌山県農業試験場内の細粒黄色土の水田圃場(トルオーグリン酸 $7.0\text{mgP}_2\text{O}_5/100\text{g}$, 以下, 和歌山土壌)及び宮崎県総

合農業試験場内の細粒灰色低地土の水田圃場(トルオーグリン酸 $6.7\text{mgP}_2\text{O}_5/100\text{g}$, 以下, 宮崎土壌)から水稲非作付け期間に採取した土壌を風乾処理後, 径2mmのふるいを通して供試した。第1表に示すとおり, 和歌山, 宮崎それぞれの土壌に, 各地域で一般的に用いられている堆肥もしくは有機配合肥料, 有機質肥料を供試して試験を行った。すなわち, 風乾土100gに対して, 和歌山土壌には施用資材としてハイパーCDU入り有機配合肥料(商品名「ハイパーCDU入り豆用配合肥料」, 実エンドウが吸収する肥料成分相当を施用することを目的とした新規開発肥料)を0.3g, 牛ふんオガクズ堆肥を2g, 宮崎土壌には有機質肥料D(商品名「デルプラス」, 宮崎県の農家で一般的に使用されている有機質肥料)を0.25g混和した。さらにリン酸肥料の可給態リン酸量の変化に及ぼす太陽熱土壌消毒の影響を評価することを目的として過リン酸石灰を和歌山土壌には56mg, 112mg, 168mg(それぞれ10kgP₂O₅, 20kgP₂O₅, 30kgP₂O₅/10a相当), 宮崎土壌には56mg, 112mg(それぞれ10kgP₂O₅, 20kgP₂O₅/10a相当)混和した。対照として資材を施用しない土壌のみの処理も設定した。供試した土壌, 肥料及び牛ふんオガクズ堆肥の理化学性を第2表に示す。

肥料及び堆肥を土壌に混和後, イオン交換水を霧吹きで加えて最大容水量の60%(含水率は和歌山土壌で21.9%, 宮崎土壌で26.0%)に土壌水分を調整

第1表 供試した有機質肥料および堆肥の成分施用量

供試土壌	施用資材	成分含量(%)			混和量 (kg/10a相当)	成分施用量(kg/10a相当)		
		N	P ₂ O ₅	K ₂ O		N	P ₂ O ₅	K ₂ O
和歌山土壌	ハイパーCDU入り有機配合肥料	8	3	7	300	24	9	21
	牛ふんオガクズ堆肥	1.70	0.97	1.26	2000	34	19	25
	過リン酸石灰(10kgP ₂ O ₅)	0	18	0	56	0	10	0
	過リン酸石灰(20kgP ₂ O ₅)	0	18	0	112	0	20	0
	過リン酸石灰(30kgP ₂ O ₅)	0	18	0	168	0	30	0
宮崎土壌	有機質肥料D	6	8	3	250	15	20	8
	過リン酸石灰(10kgP ₂ O ₅)	0	18	0	56	0	10	0
	過リン酸石灰(20kgP ₂ O ₅)	0	18	0	112	0	20	0

第2表 供試した土壌及び牛ふんオガクズ堆肥の理化学性

	pH(H ₂ O)	有効態リン酸 mg/100g	リン酸 吸収係数	全炭素 %	全窒素 %	C/N	交換性K mg/100g
和歌山土壌	5.4	7.0	442	1.38	0.15	9.2	8.9
宮崎土壌	6.1	6.7	513	1.41	0.13	10.8	15.0

	水分 %	pH	リン酸* %	全炭素 %	全窒素 %	C/N	カリ* K ₂ O%
ハイパーCDU入り有機配合肥料	—	—	3	33.4	8.6	3.9	7
有機質肥料D	—	—	8	36.3	6.3	5.8	3
牛ふんオガクズ堆肥	51.27	5.47	0.97	24.3	1.70	14.3	1.26

*肥料の保証成分含量

した。今回対象とした和歌山の実エンドウ、宮崎のトマトの栽培現場では太陽熱土壌消毒を行う場合は散水を行うことから太陽熱土壌消毒中に水は下方に移動しやすいと想定して、水が下方に移動しやすい条件として底部に5mm程度のれき（商品名：えぞれき）25gを充填した250mLポリビンに水分を調整した土壌を充填した。れきの高さは底面から約30mm、ポリビン上部の空間（ヘッドスペース）は肩の部分までそれぞれ約35mm（和歌山土壌）、43mm（宮崎土壌）であった。

それぞれ45℃（温熱あり）もしくは30℃（温熱なし）のインキュベーター内で3週間静置した（温熱処理）。栽培現場で指導されている太陽熱土壌消毒時の目安温度は40℃もしくは45℃と県によって多少異なるが、本試験では45℃を温熱ありの温度とし、太陽熱土壌消毒を行わない場合も夏場の施設内の温度は露地より高くなることから、一般的な培養試験よりやや高い30℃を温熱なしの温度とした。また、一般的には畝立時にマルチを張り、ビニールで土壌表面を覆って土壌消毒処理を行うことから空気の入りがある程度制限される条件にするため、ポリビンのふたをゆるく締めて温熱処理を行った。

温熱処理終了後にポリビン中の土壌を生土で採取し、温熱処理後の土壌として分析に供試した。なお、最大容水量の60%に調整した直後の土壌を温熱処理前の土壌として分析に供試した。

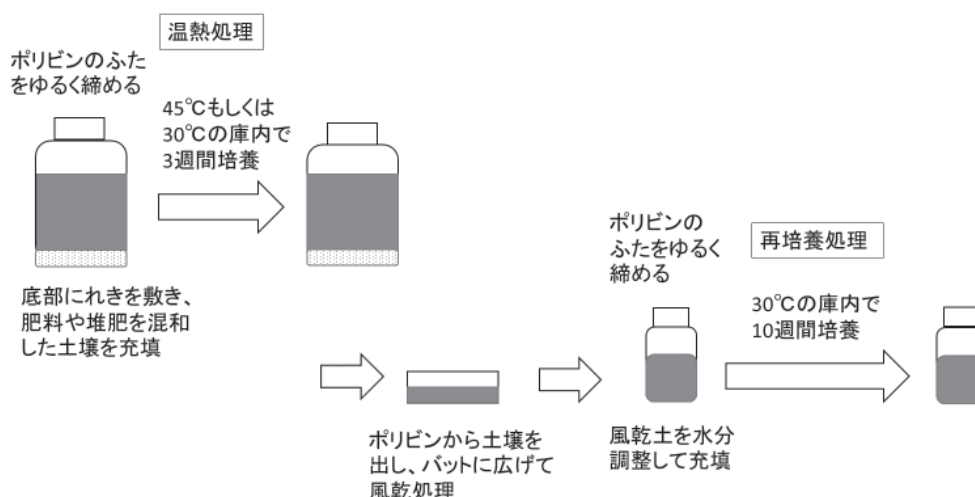
温熱処理前、温熱処理後の土壌について可給態リン酸をトルオーグ法（Truog, 1930）に準じて分析した。すなわち生土で約1g（乾土約0.8g相当）を

250mLポリビンに精秤し、抽出液200mLを加えて振とう抽出後、ろ液中の無機リン酸をモリブデンブルー法で比色定量した。また、温熱処理による土壌微生物由来のリン酸の可給化量を評価することを目的として、土壌のみを温熱処理した区の土壌バイオマスリン酸をクロロホルムくん蒸抽出法の改良法（杉戸・吉田, 2006）で分析した。

次に温熱処理終了後の土壌をポリビンから出して室温で風乾し、この風乾土40gにイオン交換水を霧吹きで加えて和歌山土壌は最大容水量の60%に、宮崎土壌は60%では播種時の水分条件としてはやや高いと判断して50%に水分調整を行い、100mLポリビンに充填した後、30℃のインキュベーター内に静置した（以下、再培養処理）。なお、風乾処理は実際の太陽熱土壌消毒後の条件とは異なるが、今回対象とした栽培現場では太陽熱土壌消毒後に播種・定植に適する条件まで土壌をやや乾燥させることを考慮すると同時に、再培養処理時のサンプル間の土壌水分条件を合わせるために行った。また、今回対象とした実エンドウ、トマトでは畝にマルチを張った条件で栽培することから、再培養処理時もポリビンのふたをゆるく締めて処理を行った。

温熱処理後の風乾土（再培養処理前土壌として）、2週後、6週後、10週後の土壌を採取し、可給態リン酸をトルオーグ法に準じて分析した。すなわち再培養処理前のみ風乾土で、それ以外は生土でいずれも約1g（生土の場合、乾土約0.8g相当）を分析に供試した。以上の培養実験系の概要を第1図に示す。

太陽熱土壌消毒を模した室内実験の手順



第1図 太陽熱土壌消毒を模した室内実験系の概要

2) 太陽熱土壌消毒をした場合の堆肥、有機配合肥料及び有機質肥料から供給される可給態リン酸量の推定

II. 1. 1) の試験により得られたデータを用いて、畝立後消毒体系において土壌に堆肥、資材及びリン酸肥料を施用することで増加する可給態リン酸量を推定した。第3表に示す通り、45°C培養（温熱あり）の処理区について和歌山土壌では牛ふんオガクズ堆肥（W2）、ハイパーCDU入り有機配合肥料（W3）、過リン酸石灰（W4～W6）を施用した土壌から土壌のみ（W1）を温熱処理した場合の、宮崎土壌では有機質肥料D（M2）、過リン酸石灰（M3, M4）を施用した土壌から土壌のみ（M1）を温熱処理した場合の、それぞれの可給態リン酸量の差を「資材由来のリン酸可給化量」とした。例えば、温熱処理後のハイパーCDU入り有機配合肥料を施用した土壌の可給態リン酸量11.1mgP₂O₅/100g（W3）と、温熱処理後の土壌のみの可給態リン酸量5.33mgP₂O₅/100g（W1）との差、5.77mgP₂O₅/100g（W3-W1）が温熱処理後のハイパーCDU入り有機配合肥料由来のリン酸可給化量である。

この資材由来のリン酸可給化量と過リン酸石灰由来のリン酸可給化量について、再培養処理前の値と再培養処理中の経時的变化の推移の両面から比較することで、資材由来のリン酸可給化量が過リン酸石灰を何kg/10a施用した場合に相当するかを推定した。

2. 畝立後消毒体系と慣行の消毒体系でのリン酸肥料由来のリン酸可給化量の経時的变化の比較

太陽熱土壌消毒前に施肥を行う畝立後消毒体系と、太陽熱土壌消毒後に施肥を行う慣行の消毒体系との、作物栽培期間中のリン酸肥料の経時的变化に相違が生じるかを検討するため、以下の試験をおこなった。和歌山土壌の風乾土40gに過リン酸石灰

22mg, 45mg, 67mg（それぞれ10kgP₂O₅, 20kgP₂O₅, 30kgP₂O₅/10a相当）を混和した後、最大容水量の60%の水分に調整して100mLのポリビンに充填し、30°Cのインキュベーター内に静置した。開始時（肥料混和後、最大容水量の60%の水分に調整した土壌）、6日後、2週後、6週後及び10週後の可給態リン酸量をトルオーグ法に準じて分析した。すなわち生土で約1g（乾土約0.8g相当）を分析に供試した。得られた結果を、II. 1. 1) の試験の畝立後消毒体系に相当する過リン酸石灰施用、45°C培養（温熱あり）後に再培養処理をした試験区の可給態リン酸量の変化と比較することで、温熱処理に対するリン酸施肥時期の違いがリン酸肥料の肥効に及ぼす影響を検討した。

3. 統計解析

統計解析は「エクセル統計2012（社会情報サービス社）」を用いた。土壌及び施用資材毎に温熱処理の有無と可給態リン酸の分析時期を二因子とした分散分析を行った結果、要因間に相互作用が認められたことから、それぞれの要因の影響について多重比較検定（Scheffe法）を行った。

III. 結果

1. 温熱処理前後及び再培養処理前後の土壌、肥料及び堆肥由来の可給態リン酸量の推定

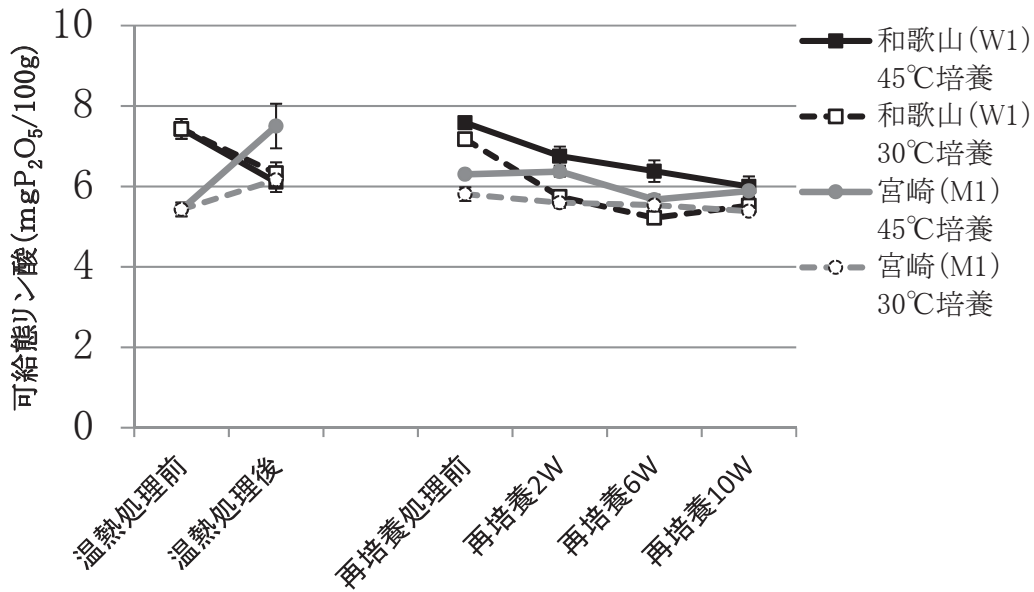
1) 室内培養試験での可給態リン酸量、土壌バイオマスリン酸量の変化

供試土壌を温熱処理及び再培養処理した場合の可給態リン酸の変化を第2図に示す。和歌山土壌では、温熱処理時の温度にかかわらず、温熱処理後の可給態リン酸量は温熱処理前よりも有意に低くなった。ただし、温熱処理前と再培養処理前との間に有意な差は認められなかった。また、再培養処理中の可給態リン酸量は経時的に減少したものの、45°C培

第3表 資材由来のリン酸可給化量の算出

供試土壌	施用資材	処理区記号	資材由来のリン酸可給化量の計算*
和歌山土壌	なし(土壌のみ)	W1	
	牛ふんオガクズ堆肥	W2	W2-W1=牛ふんオガクズ堆肥由来のリン酸可給化量
	ハイパーCDU入り有機配合肥料	W3	W3-W1=ハイパーCDU入り有機配合肥料由来のリン酸可給化量
	過リン酸石灰(10kgP ₂ O ₅)	W4	W4-W1=過リン酸石灰(10kgP ₂ O ₅)由来のリン酸可給化量
	過リン酸石灰(20kgP ₂ O ₅)	W5	W5-W1=過リン酸石灰(20kgP ₂ O ₅)由来のリン酸可給化量
	過リン酸石灰(30kgP ₂ O ₅)	W6	W6-W1=過リン酸石灰(30kgP ₂ O ₅)由来のリン酸可給化量
宮崎土壌	なし(土壌のみ)	M1	
	有機質肥料D	M2	M2-M1=有機質肥料D由来のリン酸可給化量
	過リン酸石灰(10kgP ₂ O ₅)	M3	M3-M1=過リン酸石灰(10kgP ₂ O ₅)由来のリン酸可給化量
	過リン酸石灰(20kgP ₂ O ₅)	M4	M4-M1=過リン酸石灰(20kgP ₂ O ₅)由来のリン酸可給化量

*同一時期に45°Cで温熱処理を行った処理区間の差



第2図 温熱処理及び再培養処理による土壤由来の可給態リン酸の経時的変化

n=4, 図中のエラーバーは標準偏差を示す。

凡例中のW1, M1は第3表の処理区記号を示す。

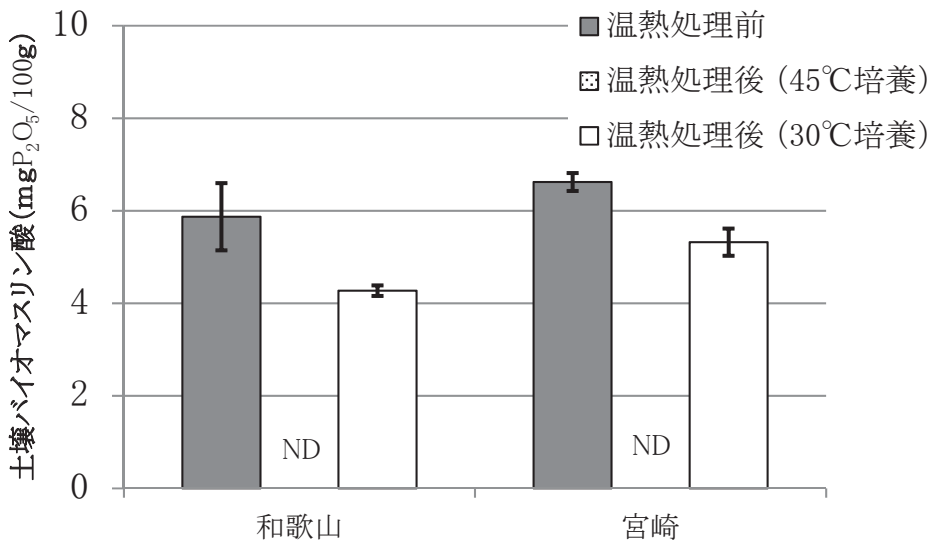
45°C培養：温熱処理時に45°Cで培養（温熱あり）

30°C培養：陽熱処理時に30°Cで培養（温熱なし）

養では30°C培養と比較して有意に高く推移した。一方、宮崎土壤では温熱処理後の可給態リン酸量は温熱処理前よりも有意に高くなった。また、45°C培養で30°C培養と比較して、再培養6週以外で可給態リン酸量が有意に高く推移した。

温熱処理前後の土壤バイオマスリン酸量を第3図に示す。土壤バイオマスリン酸は和歌山土壤、宮崎土壤とも45°C培養で未検出、すなわちクロロホルム

でくん蒸した土壤とくん蒸しない土壤それぞれから抽出されるリン酸量の差がマイナスとなった。仮に、くん蒸した土壤のリン酸量とくん蒸しない土壤のリン酸量の差が統計的に有意となる場合の最小値を検出限界値として試算して、土壤バイオマスリン酸量に換算した結果、和歌山土壤、宮崎土壤それぞれで1.6, 1.3mgP₂O₅/100gとなった。この値から土壤バイオマスリン酸の減少量を試算すると、45°C培



第3図 温熱処理前後の土壤バイオマスリン酸

n=4, 図中のエラーバーは標準偏差を示す。

和歌山土壤、宮崎土壤のいずれも温熱処理後（45°C培養）の土壤バイオマスリン酸はND（未検出）

養では土壌バイオマスリン酸は約2割に減少していたことになる。一方、太陽熱土壌消毒後の生菌数が半減したという知見（伊藤ら，2000）や、蒸気消毒処理後の土壌バイオマス炭素が半減したという報告（田中ら，2001）がある。本試験で45℃培養後の土壌バイオマスリン酸が約2割まで減少したとする推定ではやや減少量が多いが、試算に基づく推定値としてはおおむね妥当と判断した。

和歌山土壌に牛ふんオガクズ堆肥もしくはハイパーCDU入り有機配合肥料を施用した場合の温熱処理前後及び再培養処理中の可給態リン酸の変化を第4図に示す。

牛ふんオガクズ堆肥施用の場合、温熱処理の有無にかかわらず、温熱処理後の可給態リン酸量は有意に低下した。また、土壌のみの場合（第3図）と同様に再培養処理中の可給態リン酸量は経時的に減少した。45℃培養で30℃培養と比較して再培養2週及び6週で可給態リン酸量が有意に高く推移したが、再培養10週では有意な差は認められなかった。一方、ハイパーCDU入り有機配合肥料施用では、いずれの時期においても45℃培養で30℃培養と比較して可給態リン酸量が有意に高くなった。

宮崎土壌に有機質肥料Dもしくは過リン酸石灰を施用した場合の温熱処理前後及び再培養処理中の可

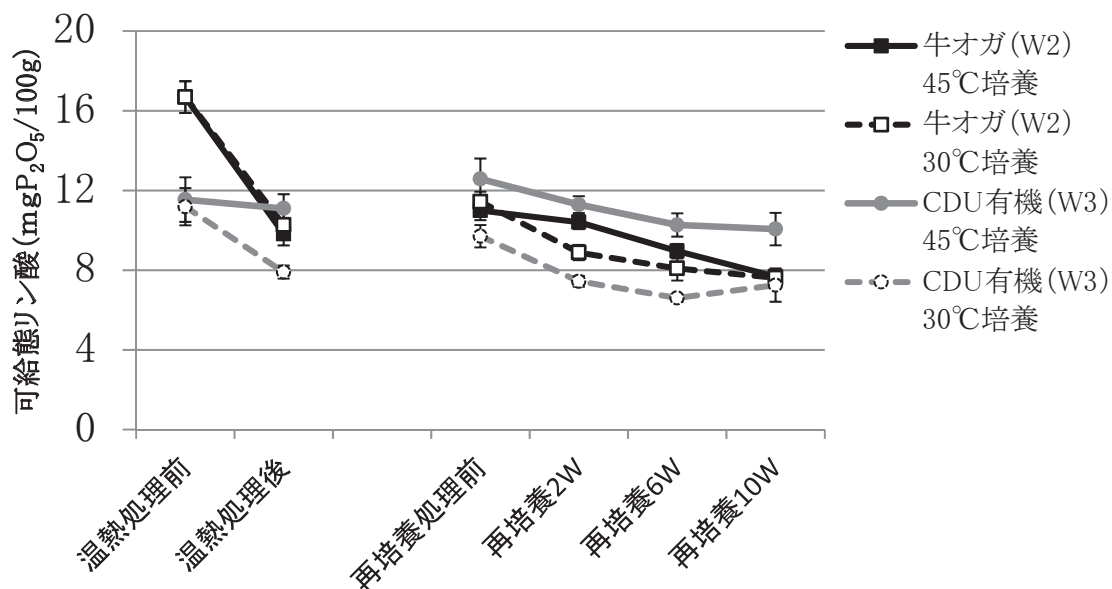
給態リン酸の変化を第5図に示す。有機質肥料D施用では、温熱処理後及び再培養2週ではハイパーCDU入り有機配合肥料施用時と同様に45℃培養で30℃培養と比較して可給態リン酸量が有意に高くなったが、再培養6週以降では有意な差は認められなかった。

過リン酸石灰施用の場合は、牛ふんオガクズ堆肥施用時と同様に、温熱処理の有無にかかわらず温熱処理後の可給態リン酸量は有意に低下した。また、再培養処理中の可給態リン酸量は経時的に減少し、45℃培養と30℃培養との間に有意な差は認められなかった。

2) 温熱処理を行った場合の堆肥、有機配合肥料及び有機質肥料から供給される可給態リン酸量の推定

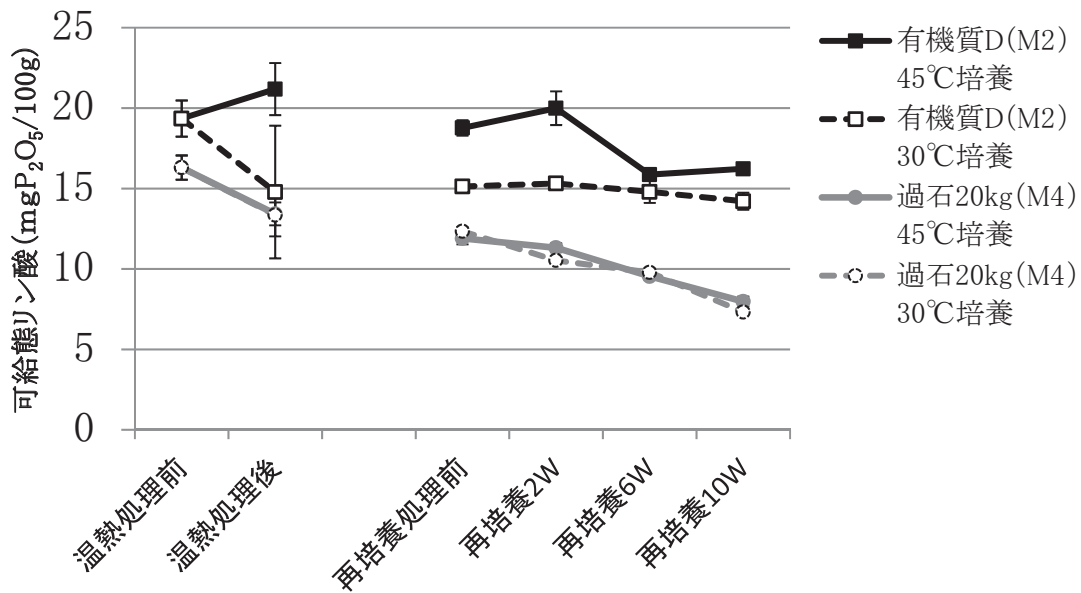
堆肥、有機配合肥料及び有機質肥料から供給される可給態リン酸量を、過リン酸石灰を施用した場合と比較したリン酸可給化量は、牛ふんオガクズ堆肥20kgP₂O₅/10a相当施用（W2-W1）では過リン酸石灰10kgP₂O₅/10a（W4-W1）、ハイパーCDU入り有機配合肥料9kgP₂O₅/10a相当施用（W3-W1）では過リン酸石灰20kgP₂O₅/10a（W5-W1）を施用した場合と同等のリン酸可給化量が見込めた（第6図）。

また、有機質肥料D20kgP₂O₅/10a相当施用（M2-



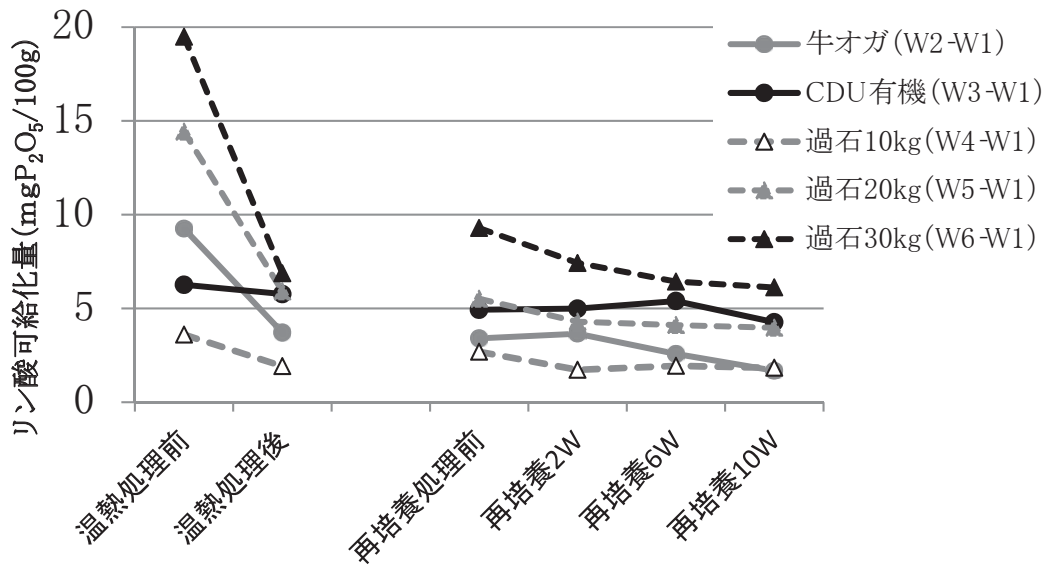
第4図 温熱処理及び再培養処理による堆肥、有機配合肥料施用時の可給態リン酸量の経時的変化（和歌山土壌）

n=4, 図中のエラーバーは標準偏差を、
凡例中のW2, W3は第3表の処理区記号を示す。
牛オガ=牛ふんオガクズ堆肥
CDU有機=ハイパーCDU入り有機配合肥料



第5図 温熱処理及び再培養処理による有機質肥料，リン酸肥料施用時の可給態リン酸量の経時的変化（宮崎土壌）

n=4, 図中のエラーバーは標準偏差を,
凡例中のM2, M4は第3表の処理区記号を示す。
有機質D=有機質肥料D（商品名「デルプラス」）
過石20kg=過リン酸石灰20kgP₂O₅/10a



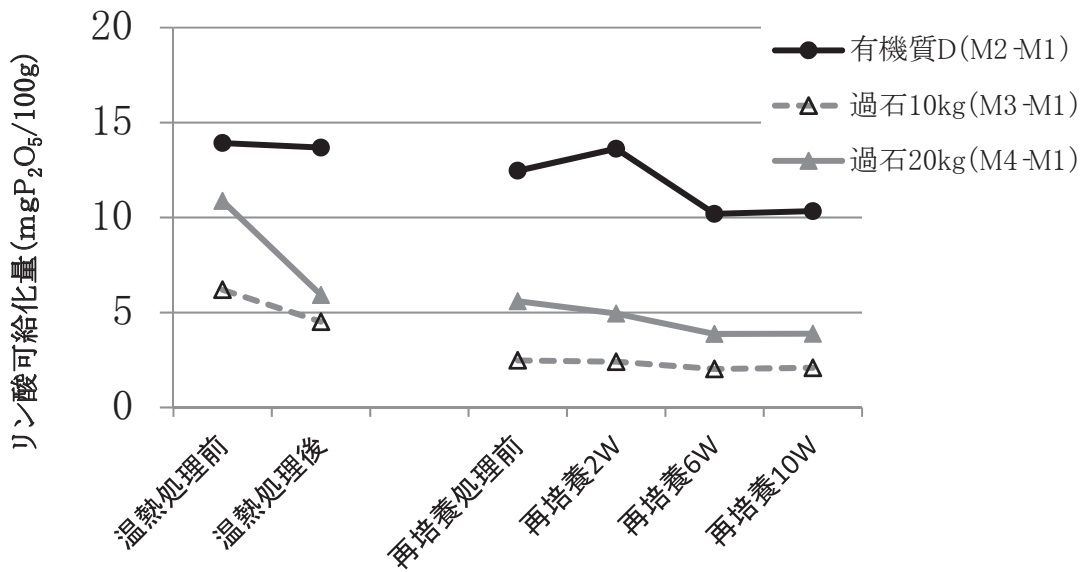
第6図 肥料及び堆肥施用土壌でのリン酸可給化量（和歌山土壌）

凡例中のW1~W6は第3表の処理区記号を示す。
過石10kg=過リン酸石灰10kgP₂O₅/10a
過石30kg=過リン酸石灰30kgP₂O₅/10a

M1) では過リン酸石灰20kgP₂O₅/10a (M4-M1) 施用以上のリン酸可給化量が見込めることが示された(第7図)。

2. 畝立後消毒体系と慣行の消毒体系でのリン酸肥料由来の可給態リン酸量の経時的変化の比較

過リン酸石灰施肥後に温熱処理及び再培養処理を行った土壌（畝立後消毒体系）と，温熱処理を行わずに過リン酸石灰を施肥して30°Cで培養した土壌

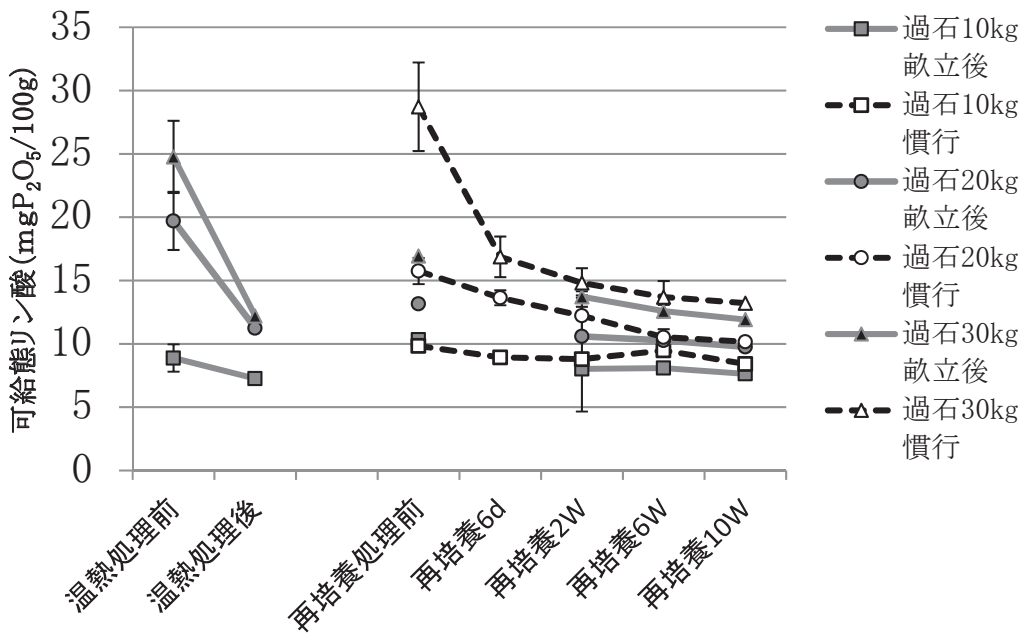


第7図 肥料施用土壌でのリン酸可給化量 (宮崎土壌)

凡例中のM1~M4は第3表の処理区記号を示す。

(慣行体系)の可給態リン酸量を第8図に示す。畝立後消毒体系の過リン酸石灰10kgP₂O₅/10a施用区では再培養処理前の可給態リン酸量がもっとも高くなったが、それ以外は畝立後消毒体系、慣行体系のいずれも過リン酸石灰の施用直後に可給態リン酸量はもっとも高かった。過リン酸石灰10kgP₂O₅/10a施

用では畝立後消毒体系、慣行体系の間に可給態リン酸量の有意な差は認められず、いずれの体系でも施用直後の可給態リン酸量の増加量や、培養に伴う経時的变化は小さかった。過リン酸石灰20kgP₂O₅/10a施用では可給態リン酸量は経時的に減少し、再培養2週までは慣行体系で畝立後消毒体系よりも有意に



第8図 リン酸肥料の施肥時期の違いが可給態リン酸量の経時的变化に及ぼす影響 (和歌山土壌)

n=4, 図中のエラーバーは標準偏差を示す。
 畝立後：畝立後消毒体系 (施肥後45℃培養)
 慣行：慣行体系 (風乾土に施肥)

高かったが、その後は有意な差は認められなかった。過リン酸石灰 $30\text{kgP}_2\text{O}_5/10\text{a}$ 施用では可給態リン酸量は経時的に減少し、再培養処理前では慣行体系で畝立後消毒体系よりも有意に高かったが、その後は有意な差は認められなかった。

IV. 考 察

1. 土壤からの可給態リン酸の供給に及ぼす温熱処理の影響

土壤のみを温熱処理した場合、宮崎土壤では温熱処理後の可給態リン酸量は温熱処理前よりも有意に高くなった。また、再培養処理時の可給態リン酸量は宮崎土壤の再培養6週を除けば 45°C 培養で 30°C 培養よりも有意に高く推移した。しかし、その増加量は最大でも $1.3\text{mgP}_2\text{O}_5/100\text{g}$ （宮崎土壤の温熱処理後）と少なかった上に、再培養10週では温熱処理の有無による可給態リン酸量の差は和歌山土壤、宮崎土壤のいずれでも認められなかった（第2図）。

なお、本試験における培養試験は可給態（トルオーグ）リン酸の低い水田土壤だけで行っており、畑土壤など他の土壤での検討を行っていない。水田土壤では乾土効果で土壤中の有機物の分解が生じやすいことが畑土壤との大きな違いと考えられるが、本試験では水稻非栽培期間中に採取し、風乾処理を行った土壤を培養試験に用いたことから、培養試験の間に土壤中の有機物の分解により供給された可給態リン酸量は畑土壤とそれほど変わらないと考え、以下の考察を行う。

Gelsominoら（2006）は圃場試験において72日間の太陽熱土壤消毒を行い、太陽熱土壤消毒処理開始直後に土壤中の可給態リン酸が太陽熱土壤消毒を行わない場合と比較して最大で約 $0.7\text{mgP}/\text{kg}$ （ $0.16\text{mgP}_2\text{O}_5/100\text{g}$ ）増加したが、太陽熱土壤消毒による可給態リン酸量の増加に有意な差は認められなかったことを示している。よって、施肥後に太陽熱土壤消毒を行う畝立後消毒体系においても、土壤からの可給態リン酸量の供給は慣行体系とおおむね同等であり、考慮する必要はないと判断した。

ただし、リン酸含量の高い易分解性の有機物に富む土壤であれば、後述する有機配合肥料や有機質肥料を施用した土壤同様に温熱処理による可給態リン酸の増加が生じる可能性もあり、今後の検討を要する。

一方、土壤バイオマスリン酸は温熱処理前の2割

程度に減少していたと推定したが、可給態リン酸の増加は判然としなかった（第3図）。土壤微生物菌体中のリン酸は土壤中で分解されやすい核酸、リン酸エステル、リン脂質などが主たる形態であるとされている（Webley and Jones, 1971）。そのため、当初は温熱処理によって土壤バイオマスリン酸が減少した分の菌体は速やかに分解され、可給態リン酸として土壤中に供給されると予想したが、想定とは異なる結果となった。これは、主として増加したリン酸が土壤に吸着されたことによると考えられた。例えば第8図の慣行体系で過リン酸石灰 $20\text{kgP}_2\text{O}_5/10\text{a}$ 施肥した場合、施肥前の土壤とのトルオーグリン酸の差は $10.5\text{mgP}_2\text{O}_5/100\text{g}$ であったが、施肥後2週には $6.3\text{mgP}_2\text{O}_5/100\text{g}$ となり、 $4.1\text{mgP}_2\text{O}_5/100\text{g}$ 減少していた。温熱処理による土壤バイオマスリン酸の推定減少量は和歌山土壤、宮崎土壤でそれぞれ 4.3 、 $5.3\text{mgP}_2\text{O}_5/100\text{g}$ となることから、土壤バイオマスリン酸由来の可給態リン酸が過リン酸石灰を施肥した場合と同様に土壤に吸着した可能性は十分考えられる。さらに、今回供試した土壤の土壤バイオマスリン酸は堆肥を連用してトウモロコシ・イゲンマメの交互作用を行った黒ボク土の土壤バイオマスリン酸と同程度（Sugito et al., 2010）と比較的高めであったことから、温熱処理による土壤バイオマスリン酸由来の可給態リン酸の増加は量的にも期待できないと判断した。

2. 堆肥、有機配合肥料及び有機質肥料からの可給態リン酸の供給に及ぼす温熱処理の影響

牛ふんオガクズ堆肥施用では温熱処理及び再培養処理を行うことで徐々に減少した（第4図）。温熱処理前の牛ふんオガクズ堆肥施用土壤の可給態リン酸は $16.7\text{mgP}_2\text{O}_5/100\text{g}$ で、土壤の可給態リン酸より $9.3\text{mgP}_2\text{O}_5/100\text{g}$ 高かったことから、牛ふんオガクズ堆肥施用土壤での可給態リン酸の経時的変化は温熱処理の有無に関わらず、牛ふんオガクズ堆肥中に含有されるトルオーグ法の抽出液で抽出される無機態リン酸が温熱処理及び再培養処理中に土壤に吸着したことによると考えられた。

ただし、一時的とはいえ再培養2週、6週においては 45°C 培養で 30°C 培養よりも可給態リン酸は高くなった。この理由は不明であるが、これまでに太陽熱土壤消毒による土壤の物理性の変化も指摘されている（Chen et al., 1991）ことから、太陽熱土壤消

毒によるリン酸の土壌への吸脱着特性の変化について今後の検討が必要であると考えられる。

また、堆肥は堆肥化過程で数週間に渡り60~70℃程度の発熱過程を経ていることから、今回供試した牛ふんオガクズ堆肥には後述する有機配合肥料や有機質肥料に含まれる魚粕、菜種粕、米ぬかのようなリン酸を含有し、温熱処理による分解促進が想定される有機成分はほとんどなかったと考えられた。一方、Gelsominoら(2006)は圃場試験で堆肥を施用して太陽熱土壌消毒を行うことで有意な差ではなかったものの、可給態リン酸の顕著な増加が認められたことを示している。堆肥の性質は原材料、製造方法によって多様であることから、太陽熱土壌消毒により可給態リン酸が増加する堆肥もあると考えられる。よって畝立後消毒体系で堆肥を施用する場合には、実際に施用する堆肥を用いて可給態リン酸の供給量を評価する必要がある。

一方、ハイパーCDU入り有機配合肥料及び有機質肥料Dの施用では、45℃培養では温熱処理後の可給態リン酸量は温熱処理前と同程度であり、ハイパーCDU入り有機配合肥料では再培養10週まで、有機質肥料Dでは再培養2週まで、30℃培養と比較して有意に高くなった(第4図、第5図)。ハイパーCDU入り有機配合肥料に含まれるリン酸の原材料の半分強を占める骨粉はリン酸肥料としては緩効性であるが、残り4割は比較的分解が早いとされる有機質資材(野口, 1992)である菜種粕と魚粕で配合されている。Chenら(1999)は、太陽熱土壌消毒を行うことで、有機物が分解する際に生じるような緩やかな加水分解反応あるいは解重合により溶存態有機物の増加が生じた可能性を示している。また、太陽熱土壌消毒を行うことで土壌中の易分解性有機物の無機化を促進したという知見(Gelsomino et al., 2006; Stapleton et al., 1985)がある。本試験においても、ハイパーCDU入り有機配合肥料に含有されている菜種粕と魚粕が温熱処理により分解、無機化したことで、リン酸が可給化した可能性が考えられた。

宮崎土壌に施用した有機質肥料Dのリン酸の原材料は主として蒸製骨粉、魚粉類、米ぬかであるが、その配合割合は不明である。有機質肥料DでもハイパーCDU入り有機配合肥料と同様に魚粉類、米ぬかの分解、無機化によりリン酸の可溶化が生じていたと想定されるが、温熱処理により分解、無機化する

と考えられるリン酸資材の種類、その配合割合や製造過程の違いにより可給態リン酸量の経時的推移が異なると考えられた。しかし、配合されているリン酸資材の種類、配合割合や製造過程の違いと温熱処理による可給態リン酸量の変化との関係は不明であり、その解析は今後の課題である。

3. 堆肥及び有機質肥料から供給される可給態リン酸量の推定

リン酸可給化量は、牛ふんオガクズ堆肥20kg $P_2O_5/10a$ 相当施用(W2-W1)では過リン酸石灰10kg $P_2O_5/10a$ (W4-W1)、ハイパーCDU入り有機配合肥料9kg $P_2O_5/10a$ 相当施用(W3-W1)では過リン酸石灰20kg $P_2O_5/10a$ (W5-W1)、有機質肥料D 20kg $P_2O_5/10a$ 相当施用(M2-M1)では過リン酸石灰20kg $P_2O_5/10a$ (M4-M1)施用以上が見込めた(第6図、第7図)。前述の通り、ハイパーCDU入り有機配合肥料及び有機質肥料Dでは温熱処理による有機物の穏やかな分解とそれに続くリン酸の可溶化が土壌へのリン酸吸着を遅延したことで成分保証量以上の可給態リン酸の供給が見込めたと考えられる。

以上より、第1図に示す培養試験によって畝立後消毒体系において施用した資材(堆肥、有機配合肥料、有機質肥料)のリン酸可給化量を過リン酸石灰と比較することで、資材から供給される可給態リン酸量を推定することができた。過リン酸石灰での施用と比較した場合、今回供試した資材のうち有機質肥料Dでは成分保証量以上との評価に留まったが、ハイパーCDU入り有機配合肥料の施用では成分保証量の約2倍の、牛ふんオガクズ堆肥では温熱処理前の施用土壌の可給態リン酸の土壌との差であった9.3mg $P_2O_5/100g$ とほぼ同等の可給態リン酸が、畝立後消毒体系において供給される可能性が示された。

ただし、土壌に施用する有機物の種類によって土壌に富化されるリン酸の形態が異なるという知見(杉戸ら, 2001)もあり、太陽熱土壌消毒を行う施設土壌でも有機質資材や堆肥から供給される可給態リン酸量は施用する資材の種類によって異なることが考えられる。よって、実際の栽培現場で施用する資材毎に培養試験によりリン酸可給化量を過リン酸石灰と比較することで、畝立後消毒体系において施用した資材から供給される可給態リン酸量を推定する必要がある。

4. 施肥時期の違いによる施肥リン酸由来の可給態リン酸

過リン酸石灰の施肥時期（畝立後消毒体系もしくは慣行体系）が異なると、再培養2週までは慣行体系で畝立後消毒体系よりも可給態リン酸量が有意に高くなる場合もあったが、再培養6週以降の可給態リン酸量に有意な差は認められなかった（第8図）。慣行体系では、施用直後の可給態リン酸量を1とした時の過リン酸石灰10～30kgP₂O₅/10a施肥後6日目の可給態リン酸の割合は0.59～0.90であったことから、過リン酸石灰由来のリン酸は施肥後速やかに土壌に吸着されていたと判断できた。さらに慣行体系で畝立後消毒体系よりも有意に可給態リン酸量が多かった場合でもその差は1.6mgP₂O₅/100gと少なかった。よって、畝立後消毒体系で過リン酸石灰を施肥した場合でも、慣行体系の太陽熱土壌消毒後の施肥とほぼ同様の肥効が期待でき、慣行体系で太陽熱土壌消毒を行っていた施設栽培圃場で畝立後消毒体系を新たに行う場合でも、過リン酸石灰の施用量は従来と同量でよいことが示された。

以上より、施設土壌において畝立後消毒体系で太陽熱土壌消毒を行う場合、リン酸肥料や堆肥からのリン酸供給量は慣行体系と同等、有機質肥料や有機配合肥料など有機質のリン酸成分を含む資材を施用する場合にはリン酸供給量が慣行体系よりも増加することから、施用する資材から供給される可給態リン酸量を評価して、適切なリン酸施肥を行う必要がある。

謝 辞

本研究は「農林水産業・食品産業科学技術研究推進事業」25060の支援を受けて行われた。

研究を推進するにあたり、北海道農業研究センター研究支援センター業務第2科総括作業長の菅原保英氏には室内培養実験系の構築についてのアドバイスや分析業務の支援をいただいた。また、試験に用いた土壌及び肥料を和歌山県農業試験場の林恭弘氏、三宅英伸氏、橋本真穂氏（現和歌山県庁）、宮崎県総合農業試験場の野崎克弘氏、有簾隆男氏、篠原陽子氏から分与していただいた。ここに記して感謝する。

引用文献

- 1) 阿部清文 (2012) 不可欠用途臭化メチルの代替技術の開発・普及について. 植物防疫所病害虫情報. 第98号. 2-4. 農林水産省. 東京.
- 2) Chen, Y. Gamliel, A. Stapleton, J. J. and Aviad, T. (1991) Chemical, physical, and microbial changes related to plant growth in disinfested soils. *In* Soil Solarization. Eds. Katan, J. and DeVay, J. E., pp. 103-129, CRC Press, Boca Laton, FL.
- 3) Chen, Y. Katan, J. Gamliel, A. Aviad, T. and Schnitzer, M. (2000) Involvement of soluble organic matter in increased plant growth in solarizes soils. *Biol. Fertil. Soils*, 32, 28-34.
- 4) Gelsomino, A. Badalucco, L. Landi, L. and Cacco, G. (2006) Soil carbon, nitrogen and phosphorus dynamics as affected by solarization alone or combined with organic amendment. *Plant and Soil*, 279, 307-325.
- 5) 橋本真穂 (2013) 実エンドウ栽培での微生物分解性肥効調節型肥料を用いた太陽熱土壌消毒前全量基肥. グリーンレポート. 第507号. 10-11. JA全農. 東京.
- 6) 伊藤喜誠, 豊田剛己, 木村真人 (2000) 各種土壌消毒処理のメロンホモプシス根腐病への効果とそれに伴う土壌微生物群集の変化. *土肥誌*. 71. 154-162.
- 7) 野口勝憲 (1992) 有機質肥料の成分組成とその分解による土壌微生物相の変化. 片倉チッカリン株式会社筑波総合研究所特別研究報告. 第1号. 42-51. 片倉チッカリン株式会社. 茨城.
- 8) 岡山健夫 (1999) 太陽熱土壌消毒. 農業技術体系土壌施肥編第5巻-①土壌管理・土壌病害. 213-216. 農文協. 東京.
- 9) 白木己歳 (1999) 施設の施肥・作うね後太陽熱土壌消毒 (改良型太陽熱利用土壌消毒). 農業技術体系土壌施肥編第5巻-①土壌管理・土壌病害. 追録第10号. 216の1の6-2016の1の12. 農文協. 東京.
- 10) Stapleton, J. J. Quick, J. and DeVay, J. E. (1985) Soil solarizaion: effects on soil properties, crop fertilization and plant growth. *Soil Biol. Biochem.*, 17, 369-373.

- 11) 杉戸智子, 吉田光二, 新田恒雄 (2001) 各種有機物の施用に伴う土壌中の形態別リンの変化. 日本土壌肥科学雑誌. 72, 195-205.
- 12) 杉戸智子, 吉田光二 (2006) 黒ボク土畑の土壌微生物バイオマスリン測定のためのクロロホルムくん蒸抽出法の改良. 土と微生物. 60, 11-15.
- 13) Sugito, T. Yoshida, K. Takebe, M. Shinano, T. and Toyota, K. (2010) Soil microbial biomass phosphorus as an indicator of phosphorus availability in a Greyic Andosol. Soil Sci. Plant Nutr., 56, 390-398.
- 14) 田中壮太, 前田和寛, 岩崎貢三, 櫻井克年, 塹江まほ, 飯塚京子 (2001) 各種土壌消毒処理が土壌中の理化学性・微生物性に及ぼす影響 (予報). 土肥誌. 72, 554-557.
- 15) Truog, E. (1930) The determination of the readily available phosphorus of soils. J. Am. Soc. Agron., 22, 874-882.
- 16) Webley, D. M. and Jones, D. (1971) Biological transformation of microbial residues in soil. *In Soil Biochemistry*, Vol. 2. Ed. McLaren, A. D. and Skujins, J, 446-485, Marcel Dekker, New York.

Soil incubation experiments to elucidate the effect of solarization on available phosphate

Tomoko SUGITO¹⁾, Kenji KIMIWADA¹⁾, Norikuni OKA¹⁾, Tomoyoshi HASHIMOTO²⁾

Summary

Soil solarization is a nonchemical method for controlling soil-borne pathogens using high temperatures produced by capturing radiant energy from the sun. The high temperatures generated by solarization may affect the dynamics of nutrients such as phosphate, particularly when fertilizers or compost are applied in advance of treatment. We conducted a soil incubation experiment simulating solarization to elucidate the effects of soil solarization on phosphate availability.

Phosphate dynamics following soil solarization differed depending on the type of fertilizer or compost applied. In soil amended with fertilizer containing organic matter as a phosphate source, available phosphate increased significantly following solarization. In soil amended with phosphate fertilizer or manure compost, available phosphate remained almost constant. In unamended soil, available phosphate increased by a small but significant amount. Although soil biomass phosphate decreased after solarization, we believe that this did not contribute substantially to increasing available phosphate.

In soil amended with 2 t manure compost per 10 a, available phosphate increased following solarization by an amount equivalent to 10 kg P₂O₅ (as single superphosphate). In contrast, available phosphate increased by an amount equivalent to 20 kg P₂O₅ (as single superphosphate) in soil amended with 300 kg mixed organic fertilizer per 10 a and by more than 20 kg in soil amended with 250 kg organic fertilizer per 10 a.

The results demonstrate that soil incubation experiments simulating solarization can be used to determine optimal phosphate application rates for cultivation systems in which fertilizer or compost is applied before solarization.

Key word: soil solarization, soil incubation, available phosphate, organic fertilizer

