

論文の内容の要旨

論文題目 閉鎖型養液栽培における緩速砂ろ過法を用いた培養液除菌システムの開発と適用に関する研究

氏 名 峯 洋 子

施設栽培においては、硝酸態窒素やリンを系外へ排出することなく再利用あるいは循環利用できる、閉鎖型養液栽培システムへの移行が望まれる。養液栽培の培養液を再利用・循環利用する際に不可欠な培養液殺菌・除菌技術のひとつとして、緩速砂ろ過法の低コスト・省エネルギーで生物的除菌作用を発揮するという特性に着目した。本研究ではこの緩速砂ろ過法の培養液除菌法としての適用性を検討するために、NFT (Nutrient Film Technique: 薄膜水耕) 栽培システムの培養液循環経路に砂フィルターを組み込み、栽培管理に及ぼす影響を調べ、また除菌効果と病害拡散の抑制効果を検証した。次に、緩速砂ろ過法をより安定的で確実な培養液除菌技術とするために、除菌性能評価方法を確立して除菌性能に影響を及ぼす変動要因や、フィルターの熟成プロセスの特性についての基礎的知見を得た。

1. 緩速砂ろ過がトマト NFT 栽培管理に及ぼす影響.

トマト NFT 栽培システムの培養液循環系へ緩速砂ろ過を組み込み、培養液を常時ろ過したところ、培養液の EC (電気伝導度) にはほとんど影響を与えなかった。

培養液の pH は砂の緩衝作用のため 7 付近から動かず、酸・アルカリで pH を調整することが困難となった。しかしこのことで作物生育へ影響することはなく、また事故による pH 急変を防ぐメリットともなることから栽培管理上は問題ないと考えられた。培養液の DO (溶存酸素濃度) はろ過によってろ過前の 70~90% に減少したものの、作物が酸素欠乏を引き起こすことはなかった。培養液に含まれる無機成分のうち、Mn はろ過によりほとんどが除去され、NH₄-N も大幅に減少したが、他の主要な成分に関しては大きな影響は見られなかった。フィルターが閉塞 (目詰まり) して砂表層を掻き取るメンテナンスが必要となる頻度は、約 2 ヶ月に 1 度であった。掻き取った砂は未使用砂と比べて Mn, Fe, K の含有量が増加していた。

ろ過を組込んだ NFT システムに定植されたトマト植物は、葉脈間黄化症状が発生しやすかった。生体汁液分析および培養液中の無機成分濃度測定の結果から、それが Mn 欠乏症状であると推測された。この欠乏症状は NFT 栽培システムに緩速砂ろ過を組込んだ場合には定植 2 週間目頃から見られたが、ロックウール耕システムに組込んだ場合には半年以上見られなかった。これは灌液される前に原水と肥料が新たに追加される仕組みであること、またロックウール培地自体に Mn が含まれることが NFT の場合と異なるためと考えられた。

2. NFT における緩速砂ろ過の除菌効果と病害拡散抑制効果

NFT 培養液循環系に砂フィルターを組込んだとき、循環系内の培養液タンクに大腸菌、トマト青枯病細菌 (*Ralstonia solanacearum*), *Fusarium sp.* をそれぞれ添加したところ、ろ過された培養液中の各菌の濃度はタンク初期濃度の 1% 以下となり、除菌効果が実証された。また NFT 栽培ベッドの一部トマト個体に青枯病細菌を接種して発病させたところ、緩速砂ろ過を組込んだ NFT システムにおいては、発病株より上流の株に対する二次感染を抑えることができた。発病株からは多量の病原菌が放出され、ろ過前の培養液の病原菌濃度は常に 10⁴cfu・ml⁻¹ 以上になっていたが、ろ過直後の培養液に病原菌はまったく検出されなかった。一方、*R.solanacearum* の培養懸濁液をタンクに添加して希釈したものをフィルターに流入させて菌の排出パターンをみた実験では、ろ過水に 10²cfu・ml⁻¹ 以上の菌が検出された。この結果の違いは、病原菌が常時多量に流入してくることによって、その病原菌に特異的な生物的除去作用 (捕食等) が誘導されたためではないかと推測さ

れた。

3. 緩速砂ろ過の菌排出パターンと除菌率測定方法検討

砂フィルターに一定の菌濃度の原水を流入させ続けたところ、16 時間以上の保持時間 (retention time) ののちろ過水菌濃度が急激に上昇を始め、最大値に達した後その菌濃度をしばらく維持することがわかった。このようにプラトーに達したときの菌濃度を、ろ過水菌濃度の定常値とみなし、これと流入水菌濃度との関係から除菌率を計算した。フィルター湛水層の温度を 30℃以上に設定した高温区の砂フィルターで、温度無制御区および 15℃に設定した低温区の砂フィルターよりも除菌効果が劣った。高温区フィルターの *R. Solanacearum* 除菌率値は 86%と計算され、温度無制御区では 99%となった。この除菌率はろ過水採取時期の違いがもたらす測定誤差を排除した値といえるため、除菌効果を評価するうえでの有効な指標となった。菌の排出パターンからみて、菌のフィルター内での移動速度が水と比べて極めて遅いことが判明し、菌とろ材との間の吸着／脱着作用が除菌メカニズムに大きく関与していることが示唆された。

4. 緩速砂ろ過の除菌特性の把握

小規模なモデルフィルター 3 台を作成し、大腸菌を供試菌として流入濃度と流入期間をさまざまに変えて流入させたときの、菌の排出パターンを比較した。その結果、菌の流入期間を 3~6 時間以上持続させれば、約 6 時間の保持時間を経てろ過水菌濃度が定常状態(プラトー)に到達することが判明した。そこでこのときのろ過水菌濃度の値(定常値)と流入水菌濃度との対数差である LRD(Logarithmic reduction of microbe density)を除菌効果の指標値として砂フィルター除菌性能の評価に活用した。

除菌効果の経時的な変化を LRD で示すことで、砂フィルターの熟成プロセスすなわち除菌性能の経時的な向上を数値化することが可能となった。フィルターにバラックウール栽培の培養液排液を 5 週間以上循環させ続けたところ、LRD は初期の 1.0~1.3 から 2.5~2.8 へと上昇した。培養液排液の循環を 10 週間続けても LRD 値はほぼ同じであったため、既に 5 週間後には最大除菌性能(熟成完了状態)に到達していたと考えられた。一方、砂フィルターに清水を循環させた場合、

LRD の経時的な上昇は全く見られなかった。また一度熟成した砂フィルターに清水を流し続けると、一度上昇した LRD が初期のレベルにまで低下した。また、熟成したフィルターに、加温・曝気処理をした培養液排液を循環させ続けると、LRD は 2.5~2.8 からさらに 4 以上にまで上昇し、その後安定した。以上のことから、フィルター熟成の到達点は流入水の性質によって大きく左右されること、また、その熟成プロセスは累積的・不可逆的な一方向の変化ではなく、流入水が変わればそれに応じて逆方向(除菌性能の低下)も起こりうる、平衡状態の移動のような変化であることが判明した。

熟成のメカニズムすなわち除菌性能向上のメカニズムには、菌とろ材(ろ過膜)との吸着性の上昇が大きく関与すると考えられた。何故ならば、流入菌がろ過水へ排出されるのに要する時間(保持時間)が新規フィルターでは 6 時間以内だったのに対し、高度に熟成したフィルターでは 8~10 時間へと延びていたためである。つまり吸着性の増加により菌の移動速度が遅くなっていることを意味する。また、この高度熟成フィルターに大腸菌を大量に流入させてからフィルターを分解して砂の垂直分布を調べたところ、流入した菌の大部分が砂表層の生物ろ過膜の中に生きてまま捕捉されていることがわかった。このことは、熟成のメカニズムが捕食等の生物的除去メカニズムの強化よりはむしろ、生物ろ過膜の粘着性の高いバイオフィーム等の発達による吸着性の上昇が大きく寄与していることの例証となるかもしれない。

高度に熟成させたフィルターを用いて、大腸菌以外の植物病原菌での除菌効果を検証したところ、*Fusarium oxysporum*, *Pythium helicoides* などの菌については高い除菌効果を示したものの、*Ralstonia solanacearum* 細菌については、ろ過水に $10^4\text{cfu}\cdot\text{ml}^{-1}$ 以上の病原菌が混入し、LRD が 2 以下となる低い除菌効果であった。このように、細菌については種によって除菌効果が大幅に違うことが示されたが、これは細菌の運動性の有無に関連していると考えられた。

5. 結論

以上のことから、緩速砂ろ過法の培養液除菌技術として栽培管理上、大きな問題がないこと、および適切な熟成強化を行うことで、除菌性能が飛躍的に高まり、安定的な病害拡散抑制効果を発揮できる可能性が示された。今後、除菌されにくい菌種を用いて、その菌に特異的な除去作用が誘導されうるかどうか

の再確認が必要である.