

博士（農 学） 中 川 進 平

学 位 論 文 題 名

点滴灌漑による土壤水分環境の
制御におけるバイパス流の影響

学位論文内容の要旨

作物の根群域に少量多頻度灌漑する点滴灌漑は作物生育に最適な水分環境を構築することができる灌漑技術であり、用水の節約に長じていることから、乾燥地においては効率的な灌漑方法として早くから利用されてきた。また、灌漑に起因する塩類化や硝酸の地下水汚染等の防止に対しても効果が期待されている。しかし、局所的な供給という概念と技術には最適な灌漑強度と灌漑サイクルの決定という問題が残されている。このため、点滴による根群域への供給には鉛直方向のみならず水平方向への土壤の浸入特性を明らかにする必要がある。我が国では点滴灌漑に関する報告は少なく、適切な水管理と制御を行うためには、土壤中の水移動に関する基礎的な研究が必要不可欠である。一方、土壤中の水移動にはダルシー則に従わない速い流れとして、マクロポアを流れるバイパス流が存在する。点滴灌漑において節水を期待するには、根群域から下方への過剰な浸透の実態を明らかにする必要がある。

既往の研究から点滴灌漑下の水移動について残されている問題点を整理し、本論文では点滴灌漑によって土壤水分環境を制御するために、1.成層土壤やマクロポアを有するような不均一な土壤における点滴灌漑下の水移動について、とくに灌漑期間中の湿潤域の形成に関して検証を行う。2.マクロポアを有する土壤において根群域からの浸透損失を評価し、効率的な灌漑を行うための指標を明確にすることを目的とした。

はじめに、耕起層と耕盤層からなるハウス土壤において、灌漑強度の大きい多孔ホースを用いて湿潤域形成の実態と根群域から下方への過剰な浸透を明らかにし、灌漑効率を検討した。湿潤域は浸潤初期段階に土壤表面で水平方向に拡大し、滴下孔直下において深さ方向に伸張する逆凸型の湿潤域が形成された。時間経過の後、初期土壤水分が乾燥状態にある場合では水は水平方向に浸潤せず、深さ方向に長軸をもつ楕円形状に湿潤域が形成された。これに対して湿潤状態の場合では乾燥状態と比較すると等方向的な湿潤域の拡大が認められたが、透水性が異なる表層と耕盤層の層界が湿潤域の形成に大きく影響し、表層の湿潤域は層界を中心に水平方向に拡大した。根群域からの浸透は、初期土壤水分にかかわらずホース近傍の鉛直下方への浸透が卓越しており、湿潤状態では長時間の灌漑により側方にも浸透が大きくなつた。

また、均一系を対象としたダルシー則に基づく土壤水運動理論を用い、点滴灌漑下の水移動への適用性について検討するため、土壤水分分布と時間との関係をシミュレーションした。その結果、計算値は表層では水平方向への浸潤を過大評価し、耕盤層では鉛直下方への浸潤を過小評価することが示された。乾燥と湿潤の両水分状態とも浸潤現象を正確に表現できなかつたことは浸潤した水の一部が耕盤層に存在するマクロポアによりバイパス流を引き起こしたこと

が原因であると説明づけた。水収支法を点滴灌漑下の水移動に適用し、バイパス流による浸透損失量を明らかにした。これは、耕盤層に存在するマクロポアを移動する流れであり、長時間に及ぶ灌漑は供給量に対するバイパス流による浸透損失量の割合を増大させることが示唆された。

過剰な浸透を引き起こす原因となるマクロポアと土壤の浸入特性の関係を明らかにするため、負圧浸入計を用いた浸入試験を行った。はじめに負圧浸入計の負圧を段階的に変化させて不飽和透水係数を算出する Multiple heads 法の問題点について明らかにした。充填土壤の乾燥密度を変化させて負圧浸入試験を行った結果、測定範囲内において不飽和透水係数が大きく変化しない水分領域では、従来の室内定常法と比較した場合に差異が認められ、負圧浸入計法によって算出した透水係数が過大となることが判った。水浸入圧を吸水過程において不飽和から飽和に水分状態が転じる圧力と定義すれば、不飽和透水係数の算出に広く用いられている Wooding 式には水浸入圧が考慮されていない。上述した不飽和透水係数が大きく変化しない水分領域は水浸入圧よりも大きな圧力領域であるとし、水浸入圧を簡便に判断する方法を提案した。

また、畑地と草地における負圧及び湛水条件下の浸入試験の結果から、耕起によって形成された土塊間の孔隙、緻密な構造を有する下層土に存在する根穴や亀裂等のマクロポアが水移動に影響を及ぼす圧力を実験的に明らかにした。その結果、マクロポア流とマトリックス流を分ける境界の圧力は-5cm 程度であった。さらに、これらのマクロポアを流れるバイパス流が湛水浸潤に占める割合を定量化したところ、マクロポアの種類に関わらず 80%以上に及ぶことを明らかにした。

マクロポア流とマトリックス流の境界圧力が決定されたことから、耕起によって形成された土塊間のマクロポアを有する表層と根穴が発達している下層で構成される成層土壤の畑において、異なる灌水強度で点滴灌漑を行い、それぞれの灌水強度において根群域に対する湿潤域の形成と灌水量に占めるバイパス流の程度を明らかにした。浸潤初期段階において、湿潤域全体が耕起層にある場合では供給された水は全て貯留され、下方への損失はなかったが、マクロポアが存在する耕盤層まで湿潤域が拡大すると、灌水強度を小さくした場合でもバイパス流が発生した。灌漑強度が大きいほど耕起層の湿潤域は大きく形成されたが、灌水量に占めるバイパス流の割合も増加し、バイパス流による損失を過大にした。

さらに、マクロポア流とマトリックス流の境界圧をもとに耕起層の水移動のメカニズムを考察し、耕起層と耕盤層で構成される成層土壤における効率的な点滴灌漑方法を検討した。耕起層ではマトリックスとマクロポアの 2 重の土壤構造であり、両者の水移動が組み合わさって湿潤域が形成される。マクロポアへ水が浸入する境界圧に達する灌漑強度であれば、耕起層の湿潤域はエミッタ一直下において鉛直方向に卓越した形状となる。耕盤層にマクロポアが存在する土壤では、エミッタ一直下の耕起層と耕盤層の層界においてマトリックポテンシャルが-5cm になる時間までがバイパス流を発生させない限界の時間である。これについて土壤表面の浸潤前線の到達距離と時間の平方根の関係から、勾配が変化する時間がバイパス流発生の指標となることが示された。

本論文ではマクロポアが存在する不均一な土壤構造を有する成層土壤において点滴灌漑下の湿潤域の形成を詳細に観察し、根群域からの浸透損失が主にバイパス流によるものであることを実験的に明らかにした。本研究で得られた成果は、効率の良い灌漑方法を計画するために貢献できたと考えられる。

学位論文審査の要旨

主査教授 長谷川 周一
副査教授 長澤 徹明
副査教授 波多野 隆介
副査助教授 相馬 耀之

学位論文題名

点滴灌漑による土壤水分環境の 制御におけるバイパス流の影響

本論文は 5 章からなる頁数 133 の和文論文で、図 31、表 11、引用文献 96 を含んでいる。他に、参考論文 4 編が添えられている。

作物の根群域に少量多頻度灌漑する点滴灌漑は作物生育に最適な水分環境を構築することが可能な灌漑技術であり、用水の節約に長じている。しかし、土壤中の水移動にはダルシー則に従わない速い流れとして、マクロポアを流れるバイパス流が存在するため、適切な水管理と制御を行うためには土壤中の水移動に関する基礎的な研究が必要不可欠である。したがって、節水を期待するには、根群域から下方への過剰な浸透の実態を明らかにする必要がある。本論文では点滴灌漑によって土壤水分環境を制御するために、1.成層土壤やマクロポアを有するような不均一な土壤における点滴灌漑下の水移動について、とくに灌水期間中の湿潤域の形成に関して検証を行う。2.マクロポアを有する土壤において根群域からの浸透損失を評価し、効率的な灌漑を行うための指標を明確にすることを目的とした。

マクロポアを有する耕起層と耕盤層からなるハウス土壤において、灌水強度の大きい多孔ホースを用いて湿潤域形成の実態と根群域から下方への過剰な浸透、ならびに灌漑効率を検討した。湿潤域は浸潤初期段階に土壤表面で水平方向に拡大し、滴下孔直下において深さ方向に伸張する逆凸型の湿潤域が形成された。時間経過の後、初期土壤水分が乾燥状態にある場合では、深さ方向に長軸をもつ橢円形状に湿潤域が形成された。これに対して湿潤状態の場合では乾燥状態と比較すると等方向的な湿潤域の拡大が認められた。根群域からの浸透は、初期土壤水分にかかわらずホース近傍の鉛直下方への浸透が卓越しており、湿潤状態では長時間の灌水により側方にも浸透量が多くなった。

また、均一系を対象としたダルシー則に基づく土壤水運動理論を用い、点滴灌漑下の土壤水分分布と時間との関係をシミュレーションした。その結果、計算値は表層では水平方向への浸潤を過大評価し、耕盤層では鉛直下方への浸潤を過小評価することが示された。乾燥と湿潤の両水分状態とも浸潤現象を正確に表現できなかった。このことは浸潤した水の一部が耕盤層に存在するマクロポアによりバイパス流を引き起こしたことが原因であると説明づけた。水収支法を点滴灌漑下の水移動に適用し、耕盤層に存在するマクロポアを移動するバイパス流による浸透損失量を明らかにした。長時間に及ぶ灌水は供給量に対するバイパス流による浸透損失量の割合を増大させることが明確にされた。

過剰な浸透を引き起こす原因となるマクロポアと土壤の浸入特性の関係を明らかにするため、負圧及び湛水条件下の浸入試験を行った。その結果、根穴や亀裂、耕起によって形成された土塊間のマクロポア流とマトリックス流を分ける境界圧は-5cm程度であった。さらに、これらのマクロポアを流れるバイパス流が湛水浸潤に占める割合を定量化したところ、マクロポアの種類に関わらず80%以上に及ぶことを明らかにした。

耕起によって形成された土塊間のマクロポアを有する表層と根穴が発達している下層で構成される成層土壤の畠において、異なる灌水強度で点滴灌漑を行い、根群域に対する湿潤域の形成および灌水強度おバイパス流の関係を明らかにした。灌水強度が大きいほど耕起層の湿潤域は大きく形成されたが、灌水量に占めるバイパス流の割合も増加し、バイパス流による損失を過大にした。

さらに、決定されたマクロポア流とマトリックス流の境界圧をもとに耕起層の水移動のメカニズムを考察し、耕起層と耕盤層で構成される成層土壤における効率的な点滴灌漑方法を検討した。耕起層ではマトリックスとマクロポアの2重の土壤構造であり、両者の水移動が組み合わさって湿潤域が形成される。マクロポアへ水が浸入する境界圧に達する灌水強度であれば、耕起層の湿潤域はエミッタ一直下において鉛直方向に卓越した形状となる。耕盤層にマクロポアが存在する土壤では、エミッタ一直下の耕起層と耕盤層の層界においてマトリックポテンシャルが-5cmになる時間までがバイパス流を発生させない限界の灌水時間である。これについて土壤表面の浸潤前線の到達距離と時間の平方根の関係から、勾配が変化する時間がバイパス流発生の指標となることが示された。

本論文ではマクロポアが存在する不均一な土壤構造を有する成層土壤において点滴灌漑下の湿潤域の形成を詳細に観察し、根群域からの浸透損失が主にバイパス流によるものであることを実験的に明らかにした。本論文で得られた成果は、効率の良い点滴灌漑方法を計画するために貢献するとともに、学術的にも高く評価される。よって審査員一同は、中川進平が博士(農学)の学位を受けるのに十分な資格を有するものと認めた。