

学位論文題名

土壌－植物－大気系における 水の動態解析による蒸発散量の推定

学位論文内容の要旨

植物の蒸散および吸水は、定常流を仮定することによって、土壌から植物を通り大気へ至る連続的な経路における水移動として扱うことが可能になり、電流に関するオームの法則のアナロジーで表される。すなわち、植物体内の水分変化量が無視できる場合、蒸散と吸水は等しくなり、これによる水の流束 q は、次式によって表すことができる。

$$q = (\phi_s - \phi_r) / R_s = (\phi_r - \phi_l) / R_p = (\phi_s - \phi_l) / (R_s + R_p) \quad [1]$$

ここで、 ϕ_s 、 ϕ_r 、 ϕ_l はそれぞれ土壌、根、葉の水分ポテンシャル、 R_s は土壌抵抗、 R_p は植物抵抗である。式[1]では、流束は移動経路両端の水分ポテンシャルの差($\phi_s - \phi_l$)に比例し、流れに対する抵抗($R_s + R_p$)に反比例する。しかし、実際の圃場では、土壌から植物への水移動を複雑にする次のような要因が関与する。すなわち、1)根群域土層の水分レジムは、透水性、保水性などの土壌の水分物理性によって異なる。とくに、地下停滞水が浅い位置に存在する場合には、毛管上昇流による水供給の影響を無視できない。2)植物根系の分布は、気象条件と土壌条件によって時間的、空間的に大きく変化する。このために、現時点では、土壌・植物抵抗を直接測定することはできない。

そこで、本研究では、作物をコムギに統一して、水分特性の異なる三種の土壌、すなわち、砂丘未熟土、疑似グライ土、厚層黒色火山性土からなる畑圃場において、長期の観測および実験を行い、その結果に基づいて、1)土層の水分レジムの変化と蒸発散に対する下層停滞水の寄与の関係、2)水分レジムの変化と根系分布の変化の関係、3)水供給パターンの変化がコムギの水分状態に与える影響について解析し、停滞水をもつ圃場の水移動に関与する因子を土壌タイプごとに整理した。さらに、圃場観測の結果に基づいて、気象、土壌、作物要因の相互関係を解析し、比較的容易に測定できる変数によって土壌タイプによって変わらない蒸発散予測モデルを作成しようとした。

各圃場において、初夏～盛夏期のコムギの水分ポテンシャル(PWP)、土壌水分ポテンシャル(SWP)、停滞水位(WTD)、降水量(P)および熱収支項を継続観測した。また、0～150cmの土壌水分特性の測定、コムギの地上部および根部の生育状況の調査を行った。結果は次のように要約できる。

1)根群域土層の深さは停滞水位に依存していた。生育期間中の停滞水位は砂丘未熟土では、観測開始時(初夏)には107cmであったが、その後の無降雨期間中に

は140cmまで低下した。疑似グライ土では、観測開始時の停滞水位は64cmと高かったが、次第に低下して最も乾燥した時期には145cmまで低下した。火山性土では初期の停滞水位が130cmと低く、短時間のうちに150cm以下に低下した。下層停滞水からの毛管上昇による水分供給速度(Q)は、土壤水分の変化と透水性の測定結果から試行錯誤法によってに推定した。Qは、下層とくに停滞水上縁層の透水性に強く支配され、高水分ポテンシャル領域で透水性の高い砂丘未熟土では、表層の平均土壤水分ポテンシャルが約-0.01MPaまで低下すると停滞水からの寄与が無視できなくなり、その供給速度は $0.1 \sim 1.2 \text{ mm d}^{-1}$ 、蒸発散速度(ET)に対する寄与率(Q/ET)は最大で約60%に達した。一方、高水分ポテンシャル域で透水性が低い疑似グライ土のQは、 $0.2 \sim 0.6 \text{ mm d}^{-1}$ 、Q/ETは4~29%の範囲で変動しており、表層の土壤水分ポテンシャル低下との相関は認められなかった。停滞水位が深い火山性土のQは、観測期間を通じて $0.1 \sim 0.3 \text{ mm d}^{-1}$ と小さく、Q/ETは、3~8%の範囲にあった。また、Q/ETと表層の土壤水分ポテンシャル低下との相関は認められなかった。

2)土層の水分レジムの変化に伴う根分布の変化は、砂丘未熟土では、表層の乾燥・湿潤に対して、表層根と下層根が交互に増加・減少を繰り返し、また同期間中の下層根の伸長速度とQの平均値との間に正の相関が認められた。一方、疑似グライ土では、土壤水分ポテンシャルの変化に関係なく、停滞水位の低下にともなって根の伸長速度のピークが、表層から下層へと移動した。火山性土では、表層土壌が乾燥した時期には下層根、湿潤になった時期には上層根の伸長速度が大きくなったが、総根長は観測開始当初より非常に大きく、観測期間を通じてほぼ一定であった。

3)以上の結果より、砂丘未熟土では、表層の土壤水分ポテンシャルの低下にともなうQの増加と下層根の増加によって円滑な水吸収を実現していたのに対して、疑似グライ土では、土壤水分ポテンシャルが低下してもQの寄与は増加せず、下層土への根の伸長によって高い水吸収速度を維持したと判断された。停滞水位の低下がもたらす粗孔隙の増加とそれに誘導された根の土壌マトリックス内部への伸長が吸水条件を改善したものと考えられた。一方、火山性土では、Q/ETが非常に小さく、水源はもっぱら根群域土層の有効水に限られていたと推定される。この場合には、根群域土層の土壤水分ポテンシャル変動が系全体の水移動を制御していたと考えられる。

各圃場で実測された気象、植物、土壌データを整理して、式[2]によって蒸発散速度ETを予測するモデルを作成した。なお、式[1]のqは厳密には蒸散速度であるが、ETと高い相関を示すことが確かめられているので、これをETに置き換えても大きな誤差は生じない。

$$ET = (SWP - PWP) / Rsp \quad [2]$$

ここで、Rspは土壌・植物抵抗、SWPは根群域土層の土壤水分ポテンシャル、PWPは茎基部で測定した植物水分ポテンシャルである。圃場でのモニタリングが難しい因子であるPWPは、気温(T)、相対湿度(RH)、根群域土層の深さ(RD)、停滞水位(WTD)を用いた次式によって求めた。なお、この重回帰式の決定係数は0.65であった。

$$PWP = 0.00225 \cdot RH - 0.0132 \cdot T + 0.451 \cdot WTD - 1.07 \cdot RD + 0.139 \quad [3]$$

また、圃場における実測ETをQによって補正して得た土壌・植物抵抗Rspの変

動は、PWPと純放射量(S)を用いた式[4]によって約77%説明された。

$$Rsp = -37377 \cdot PWP - 1639.6 \cdot S + 17539 \quad [4]$$

重回帰式[3]、[4]によって得られたPWP、Rspと実測SWPを用いて、式[2]によってETを推定し、現地圃場における実測値と比較することによってモデルの有用性を検証した。実測値と予測値は、土壌の違いに関係なく、ほぼ1:1の直線に沿ってプロットされ($r=0.79^{**}$)、現地において比較的簡単に測定できるパラメータから圃場の蒸発散速度を推定するモデルとして有用なことを確認した。なお、使用した変数のうち、RDを正確に求めることによってモデルの精度を高めることができると推定された。

学位論文審査の要旨

主 査 教 授 佐久間 敏 雄

副 査 教 授 但 野 利 秋

副 査 助教授 波多野 隆 介

学 位 論 文 題 名

土壌－植物－大気系における

水の動態解析による蒸発散量の推定

本論文は、植物の蒸散および吸水に関する抵抗モデルを圃場に適用する場合の問題点を現地観測データに基づいて研究し、実用的なモデルパラメータを選択し、それによってコムギ畑の蒸発散量を推定する方法を明らかにしたものである。研究結果は5章に分けて記述され、これに緒論、研究史、総合考察が付されている。論文は、図35、表15を含む103ページの和文論文で、引用文献83が付され、別に参考論文2編が添えられている。

抵抗モデルのパラメータのうち土壌・植物抵抗は直接測定する方法がなく、これが、本モデルを現地圃場に適用する際の隘路になっている。とくに、土層の浅い位置に停滞水面が存在し、毛管上昇による水分供給が無視できない場合には、1)根群域土層の水分レジムが大きく変動すること、2)根の発達と分布が気象・土壌・植物要因によって大きく変化することのために土壌・植物抵抗を決定することが難しい。

1. この論文では、まず、抵抗モデルの適用と蒸発散量の推定に関する既往のアプローチを比較研究し、土壌・植物抵抗を圃場レベルで推定することに研究の目標をしばった。

2. この目的を達するために、作物をコムギに統一して水分物理性の異なる三種の土壌(砂丘未熟土、疑似グライ土、厚層黒色火山性土)からなる圃場において、長期の現地観測および実験を行い、1)土層の水分レジムの変化と蒸発散に対する下層停滞水の寄与、2)水分レジムの変化と根系分布の変化、3)水分供給パターンの変化がコムギの水分状態に与える影響について解析し、停滞水をもつ土壌-植物-大気系の水移動に関与する因子を土壌タイプごとに整理した。

はじめに、根群域土層の水収支、水分ポテンシャル分布と停滞水位から試行錯誤

法によって毛管上昇速度を推定し、その全水フラックスに対する寄与の程度を明らかにした。その結果、毛管上昇による水分供給速度は、停滞水上縁層の透水性に依存し、高水分ポテンシャル域の透水性が高い砂丘未熟土では、表層の平均土壌水分ポテンシャルが約 -0.01MPa まで低下すると停滞水からの寄与が無視できなくなり、それによる供給速度(Q)は $0.1\sim 1.2\text{ mm d}^{-1}$ 、全蒸発散量(ET)に対する寄与率は最大で約60%に達した。これに対し、高水分ポテンシャル域で透水性が低い疑似グライ土の Q は、 $0.2\sim 0.6\text{ mm d}^{-1}$ 、寄与率は5~30%の範囲あり、表層土壌の水分ポテンシャル低下との相関は認められなかった。停滞水位が150cm以下にあった火山性土では、 Q は 0.3 mm d^{-1} 以下と小さく、その寄与率も10%以下と低かった。また、寄与率と表層土壌の水分ポテンシャル低下の間には有意な相関は認められなかった。

次に、根張りや根群域土層の深さについて検討し、根の伸長する深さが停滞水位に依存すること、根の分布が土層の水分レジムの変化に伴って変動すること、根の伸長が下層土の物理的性質を反映して異なることなどを確認した。

さらに、以上の結果に基づいて、土壌別の特徴を次のように整理した。すなわち、砂丘未熟土では、表層の土壌水分ポテンシャルの低下に伴う Q/ET の変化と下層根の増加、②疑似グライ土では、土壌水分ポテンシャルの低下にも関わらず、停滞水位の低下にともなう新たな粗孔隙の形成とそれにともなう根の土壌マトリックス内部への伸長、③火山性土では、土壌水分ポテンシャルの変動のみによって系全体の水移動が制御されていると推定された。

4. 以上の結果を踏まえて、比較的容易に測定できる気象、植物、土壌データを用いて植物水分ポテンシャルおよび土壌・植物抵抗を推定するモデルを重回帰分析によって求め、これと実測土壌水分ポテンシャルから蒸発散量を予測する抵抗モデルを完成した。また、これによる予測値をと実測値の関係が、1:1の直線的相関関係($r=0.79^{**}$)をもつことを確認し、このモデルが蒸発散量を簡便に、かつ精度良く推定するために有用なことを明らかにした。さらに、使用した変数のうち、根の到達深度を正確に求めることがモデルの精度をさらに高めると推論している。

以上の成果は、土壌-植物-大気系における水の流れに対する土壌特性および根系の影響に関して新しい知見をもたらしただけでなく、畑圃場の水管理を合理化する上でも大きく貢献するものと評価される。よって、審査員一同は、本論文の提出者高橋千穂が博士(農学)の学位を受けるのに十分な資格があるものと認定した。