

植物根内外の物質濃度が吸水に及ぼす影響

京都大学大学院工学研究科 学生会員 東 博紀
 京都大学防災研究所 フェロー 岡 太郎

1.はじめに

植物の根による吸水・葉からの蒸散は重要な水文素過程の一つである。既存の根吸水モデルには、蒸散によって導管内が陰圧となり、それを駆動力として土壌水を吸収するという機構が多く見られる。しかし、葉面や切断した茎から導管液の流出が見られ、導管液が陽圧の時に吸水は生じている¹⁾。この流出現象は物質濃度によって発生する浸透圧によって生じており、根の内外の物質濃度が複雑に関与しているといわれている。本研究では根の水・物質吸収モデルについて検討した。さらに、それを土壌水流動解析に応用し、根内外の物質濃度が吸水に及ぼす影響を調べた。

2.根の水・物質吸収モデル

根の水と物質の吸収過程は、図1に示すように根の表面から導管までの輸送と導管内の輸送からなる²⁾。細胞の水・物質吸収には外液からの直接吸収と細胞壁アポプラストを介する吸収の2つがある。吸収された水・物質はシンプラストを介して中心柱細胞に輸送され、細胞壁アポプラストに排出されて導管に達する。導管に輸送されるまでに水・物質は細胞膜を少なくとも2回通過する必要がある。水の細胞膜通過は圧力勾配と浸透圧勾配に従う受動的な通過であるが、物質については細胞内外の濃度勾配に従う受動的な通過と化学反応による能動的な通過がある。

上述の根の水・物質輸送モデルは canal model²⁾として認められているが、実用的には煩雑である。ここでは canal model を単純化した水・物質輸送モデルとして A Maize-Root Dynamic Model³⁾(AMAIZED)(図2)を用いて根の水・物質吸収過程を検討する。AMAIZEDでは、根の表面から導管までを1層と仮定して根の単位表面積あたりの吸水量 J_r を(1)式、物質吸収量 J_{sol} を(2)式で表わしている。

$$J_r = L_p [(C_v - C_s) \sigma RT - (P_v - P_s)] \quad (1) \quad J_{sol} = J_a - L_{sol} (C_v - C_s) \quad (2)$$

ここに、 L_p 、 L_{sol} :それぞれ根の表面から導管までの水および物質の透過係数、 P_v 、 P_s :それぞれ導管液、外液の圧力、 C_v 、 C_s :それぞれ導管液、外液に含まれる物質の濃度、 J_a :化学反応による能動吸収量、 σ :反発係数(補正係数)、 R :気体定数、 T :温度である。(1)式より、 $P_v > P_s$ 時においても $C_v - C_s \gg 0$ の場合には水を吸収すること、吸収される水の物質濃度は J_{sol}/J_r であるので J_r が小さくなるほど $C_v - C_s$ は大きくなるのが分かる。

導管内の水・物質輸送の基礎式にはそれぞれ(3)、(4)式を用いる。なお、ここで扱う現象は短時間で定常に達するため、非定常項は無視した。

$$-L_v \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{\partial P_v}{\partial z} - \rho g \right) = \frac{4}{V_f d} J_r \quad (3)$$

$$J_w \frac{\partial C_v}{\partial z} = D \frac{\partial^2 C_v}{\partial z^2} + \frac{4}{V_f d} J_{sol} \quad (4)$$

ここに、 L_v :導管の水透過係数、 J_w :流束(= $-L_v \{ \partial P_v / \partial z - \rho g \}$)、 D :導管内の物質拡散係数、 V_f :(導管の断面積)/(根の断面積)、 d :根の直径、 ρ :水の密度、 g :重力加速度、 z :下向きを正とする鉛直座標である。

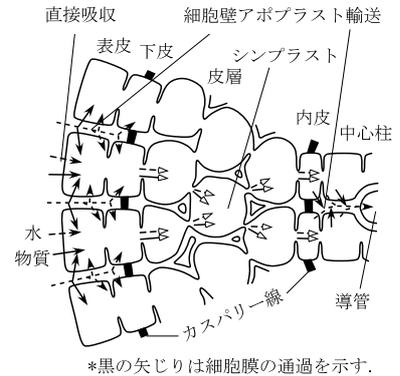


図1: トウモロコシ根の表面から導管までの水・物質輸送経路²⁾

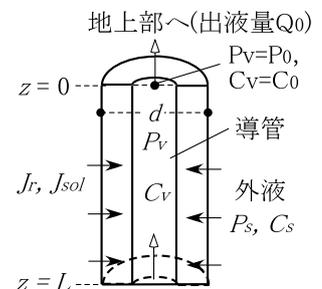


図2: AMAIZEDの概要

表1: モデル定数^{2,3,4)}

L_p	(m/MPa s)	7.5×10^{-8}
L_{sol}	(m/s)	3.0×10^{-9}
J_a	(mol/m ² s)	4.0×10^{-7}
L_v	(m/MPa s)	$20L^2 L_p / V_f d$
V_f		0.020
σ		0.85
d	(mm)	1.0
L	(m)	0.10
L : root length		

Key words: 植物根, 水・物質吸収, 物質濃度, 土壌水流動, AMAIZED, ウェイングライシメータ
 〒611-0011 京都府宇治市五ヶ庄 TEL: 0774-38-4264 FAX: 0774-38-4262

AMAIZEDをトウモロコシ根の出液現象に適用した．ここでは，表1に示すモデル定数を採用し， C_s は 20osmol/m^3 とした^{2,3,4}． P_s と導管上端の圧力(P_0)を変化させて解析した結果を図3に示す．(1)～(4)式による計算値は，Millerによって得られている導管上端からの出液量(Q_0)および物質濃度(C_0)の観測値⁴)をうまく再現した．導管内の圧力が外液の圧力よりかなり大きいときにも，物質の流入によって吸水が生じていることが確認された．

3. ウェイングライシメータへの適用

1999年4月よりウェイングライシメータを用いて水・物質収支の観測を継続している⁵)．AMAIZEDを応用して根の吸水量を求めた後，土壌水流動解析を行った．計算期間は2001年6月16～25日，植栽条件はトウモロコシ(1m²に9個体，植物丈1.6m，根群域の深さ30cm)である．植物体を対象とする場合，根系をどう取り扱うかが問題となる．本研究では根の長さ L が根群域の深さと等しいモデル根 N 本と根系が等価であると仮定した． N を根系全体の通水抵抗 $R(=\Delta\{P_s - P_0\}/\Delta Q_0)$ と等しくなるように決定したところ，植物丈1.0～1.5mにおける $R = 2.9 \times 10^4 \text{MPa s/kg}$ ($0.0 \leq P_s - P_0 \leq 0.5 \text{MPa}$)⁶)では1個体あたり560本という値が得られた．

土壌水流動の基礎式にはRichards式(5)を用いた．ここに， C :比水分容量， K :不飽和透水係数， ρ_r :単位地表面積あたりの根の本数である．試算の結果，根による物質吸収は微量であったため，土壌水に含まれる物質濃度 C_s は 8.0osmol/m^3 (2001年7月10日計測)で同様と仮定した．蒸散量，地表面からの蒸発量は我々が提案した方法⁵)で求め，それぞれ(3)，(5)式の境界条件とした．解析結果を図4に示す．蒸散量，土壌水分量ともに観測値と計算値はかなりよく一致しており，モデルの有用性が認められる．この期間では，吸水量51mmのうち物質濃度差に基づく吸水は9.1mm(18%)であった．土壌水の負圧によって値は異なるが，0.3mm/h以上では物質濃度差に基づく吸水量は減少し，全体の10%以下となった．また，夜間や雨天時の蒸散がない時の導管液は陽圧となっていることが分かる．ここでは植物体内の貯留および地上部からの出液を考慮しなかったが，実際には夜間および雨天時にも根は水を吸収し，貯留・出液していると考えられる．

$$\frac{C}{\rho g} \frac{\partial P_s}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left\{ K \left(\frac{1}{\rho g} \frac{\partial P_s}{\partial z} - 1 \right) \right\} - \rho_r \pi d J_r \quad (5)$$

4. まとめ

1. Millerの研究を参考に，AMAIZEDを用いてトウモロコシ根の吸水について解析を行った．計算値はMillerの観測値と合致した．
2. AMAIZEDを応用して根の吸水量を求めた後，ウェイングライシメータの土壌水流動解析を行った．蒸散量，土壌水分量の計算値は観測値とかなりよく一致した．より適切な解を得るためには植物体内の水・物質貯留および蒸発散などの地上部からの出液を考慮する必要がある．
3. 根の吸水量の18%は根内外の物質濃度差に基づく吸水であり，物質濃度が根の吸水に及ぼす影響は無視できないことが示された．
4. 蒸散量が0.3mm/h以上では，物質濃度差に基づく吸水量は全体の10%以下である．

参考文献

- 1) Mohr H. and Schopfer P. 原著，網野 真一・駒嶺 穆 監訳：植物生理学，シュプリンガーフェアラーク東京株式会社，pp. 1 - 598, 1999.
- 2) Taura T., Iwakawa Y. and Katou K.: A Model for Radial Water Transport Across Plant Roots, *Protoplasma*, pp.170-179, 1988.
- 3) Tyree MT., Yang S., Cruiziat P. and Steudle E.: Novel Methods of Measuring Hydraulic Conductivity of Tree Root Systems and Interpretation Using AMAIZED, *Plant Physiology*, vol.104, pp.189-199, 1994.
- 4) Miller DM.: Studies of Root Function in *Zea mays*, *Plant Physiology*, vol.77, pp.162-174, 1985.
- 5) Higashi H. and Oka T.: Measurement and Modeling of Evapotranspiration during Plant Growth, Proceedings of 13th congress of APD-IAHR, 2002(投稿中).
- 6) Wei C., Tyree MT. and Steudle E.: Direct Measurement of Xylem Pressure in Leaves of Intact Maize Plants. A Test of Cohesion-Tension Theory Taking Hydraulic Architecture into Consideration, *Plant Physiology*, vol.121, pp.1191-1205, 1999.

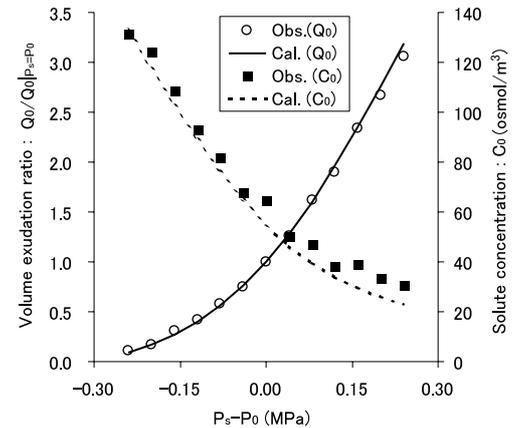


図3: 根の出液の解析結果

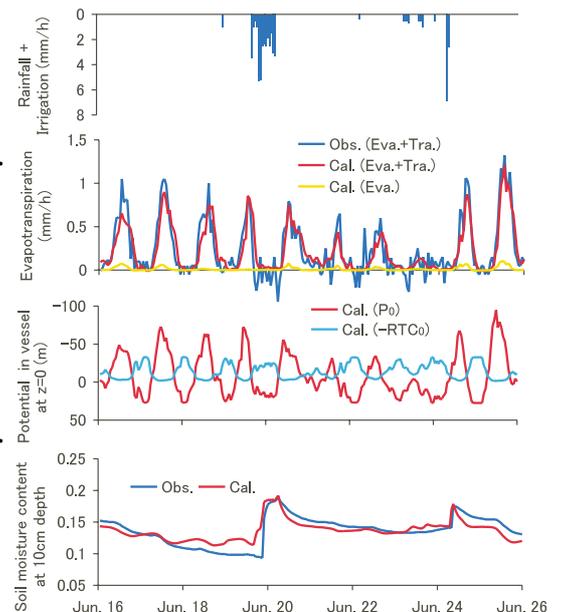


図4: 土壌水流動解析結果