

P69 3次元根系成長モデルの斜面への適用

京都大学農学研究科 ○堤大三・小杉賢一朗・水山高久

1. はじめに

植物根系は、土壤養水分の吸収、地上部支持等の機能を有する他、斜面の安定化にも寄与しており、重要な器官である。しかし、植物根系は土壤中に存在し、その調査には多くの困難が伴うため、根系、特にその成長機構には未解明な部分が数多く残されている。この問題に対する解決策の一つとして、根系成長モデルの利用が挙げられる。根系成長モデルとは、根系の成長機構を数学モデルによって表現し、計算機シミュレーションによりその成長を再現・予測するものである。また、モデルに組み込んだ成長機構の妥当性を検討するのに有効であると考えられている。農作物に関する研究分野では、根系成長モデルが用いられ一定の成果をあげている(例えば Clausnitzer, 1994)が、森林科学の分野では、ほとんど利用されていない。発表者らはこれまで、特に斜面上に生育する植物の根系形状に着目、2次元を想定した根系成長モデルを構築し、根系成長機構の検討を行ってきた(堤ら, 2001)。本研究では、モデルを3次元に拡張し、より実現象に近いモデル化を行う事によって、斜面における根系成長機構の検討を行う。

2. モデル

モデル化は、3次元を想定して行った。根の成長機構として、重力屈性、水分屈性、回旋運動を採用したが、これらはそれぞれ、実際の植物において、根の先端に近い伸長帯における偏差成長によって起こる事が確認されている。既往のモデルにおいては、各成長成分を表すベクトルの和によって根の成長速度・方向を決定するのが一般的であるが、本研究においては上記の屈性現象を実現象に即してモデル化するため、偏差成長法により成長速度・方向を決定した。水分屈性をモデル化するため、土壤水分移動を有限要素法により計算した。このため、モデルは、根系成長と根系による水分吸収を組み合わせたものである。以下に、根系成長モデルを表す式を示す。

重力屈性速度関数：

$$\begin{aligned} ER_g &= ER_{g,0} && \text{(重力側)} \\ ER_g &= ER_{g,0} + \Delta ER_g \sin \gamma && \text{(反重力側)} \end{aligned} \quad (1)$$

水分屈性速度関数：

$$\begin{aligned} ER_h &= ER_{h,0} + k_h q' && \text{(乾燥側)} \\ ER_h &= ER_{h,0} - k_h q' && \text{(湿潤側)} \end{aligned} \quad (2)$$

回旋運動速度関数：

$$ER_n = ER_{n,0} \pm \Delta ER_n \quad (3)$$

$$\beta_n = \omega_n \Delta t \quad (4)$$

ここで、 ER_g 、 ER_h 、 ER_n は、それぞれ、重力屈性、水分屈性、回旋運動による速度関数を表し、根の成長速

度は、これら3成分の和で表される。

$$ER = ER_g + ER_h + ER_n \quad (5)$$

また、 γ [rad]は根の進行方向と重力方向の成す角、 $ER_{g,0}$ [cm/hr]は根が重力方向を向いている場合の成長速度への寄与分を示すパラメータ、 ΔER_g [cm/hr] (シミュレーションに使用した値は0.0009、以下同様)は重力屈性の強さを表すパラメータ、 q' [cm/hr]は根先端部における土壤中の水フラックスの根に直角な成分、 $ER_{h,0}$ [cm/hr]は水フラックスが無い場合の成長速度への寄与分を示すパラメータ、 k_h [-] (50)は水分屈性の強さを表すパラメータ、 $ER_{n,0}$ [cm/hr]は根が回旋運動を示さない場合の成長速度への寄与分を示すパラメータ、 ΔER_n [cm/hr] (0.002)は成長差を示すと同時に回旋運動の回転半径を決めるパラメータ、 β_n [rad]は根の断面円上で ER_n の最大値を与える点を表す角度、 ω_n [rad/hr] (0.1)は回旋運動の角速度を与えるパラメータ、 Δt [hr] (0.5)は時間ステップ、をそれぞれ表す。式(5)より、 $ER_{g,0}$ 、 $ER_{h,0}$ 、 $ER_{n,0}$ の値を個別に考えることは無意味であるため、ここでは $ER_{g,0} + ER_{h,0} + ER_{n,0}$ (0.036)として、与える。

また、根系成長モデルとは別に、土壤水分移動と根系による水分吸収に対するモデルは、以下の式を用いた。水移動基礎方程式：

$$C \frac{\partial \psi}{\partial t} = \nabla [K \{ \nabla (\psi + z) \}] - S \quad (6)$$

吸水モデル式：

$$S = - \left(\frac{\theta - \theta_r}{\theta_s} \right)^b \rho \Delta \psi L \quad (7)$$

$$\Delta \psi = \psi_c + (1 + R \partial) l - \psi \quad (8)$$

式(6)は吸水項 S [cm³/hr]を考慮した Richards 式であり、式(7),(8)は、Herkelrath et al.による吸水モデルである(Herkelrath et al., 1977)。

本モデルにおいては、根の伸長に重点を置くため、分枝は一定間隔として扱った。ここでの根系成長モデルは、アカマツに代表される、直根性樹種の根系を想定しているが、特定の樹種に限定したのではなく、分枝間隔、各屈性の強度等を変化させる事により、その他の特性を持つ根系をモデル化する事も可能である。

3. 結果と考察

図1に、それぞれ a)重力屈性、回旋運動、b)重力屈性、回旋運動、水分屈性を適用し計算した根系形状の x-z 断面への投影図と、根系の中心断面における土壤の水利ポテンシャル ϕ [cm]の2次元分布を示す。a), b)ともに、根系形状に対応して土壤水分が分布しており、根系による吸水がシミュレートされている様子がわか

る。また、a)において、根の伸長方向は土壤水分分布に影響を受けず、根系は重力方向に偏った形状を示すのに対し、b)において、根の伸長方向は土壤水分分布の影響を受け、特に一次側根が重力に対して斜め方向にまっすぐ伸長している。これは、実際の植物根系において見られる傾斜重力屈性と呼ばれる形態的特徴であり、水分屈性が根系発達に大きな役割を果たしているという事を示唆している。この結果は、これまでの2次元モデルにおいて得られた結果と一致する。

図2に、傾斜角 30° の斜面における根系成長計算結果を示す。主根は、ほぼ重力方向にまっすぐ伸長している。一方、側根は斜面下側で主根からの斜出角度は小さく、上側で大きくなっており、非対称性を示している。この非対称性は、斜面における実際の植物根系に見られる現象と一致しており、斜面における根系成長にも水分屈性が、重要な役割を果たしている事がわかる。また、領域境界に達した根が、方向を変え底面に沿って斜面下側および上側に伸長する現象もモデル化しており、図2はその様子を示している。

4. おわりに

屈性現象を詳細にモデル化し、根系成長を3次元でシミュレートした。特に、本モデルは、斜面上に発達する根系に適応する事が可能であり、斜面での根系の形態的特徴（非対称性）発現のメカニズム解明につながるものと考えられる。また、根系成長機構において水分屈性が重要な役割を果たしている事が示唆されたが、これは、2次元モデルで得られた結果と一致する。今後、土壤硬度の影響を採り入れたモデル化を行うことも課題の一つである。

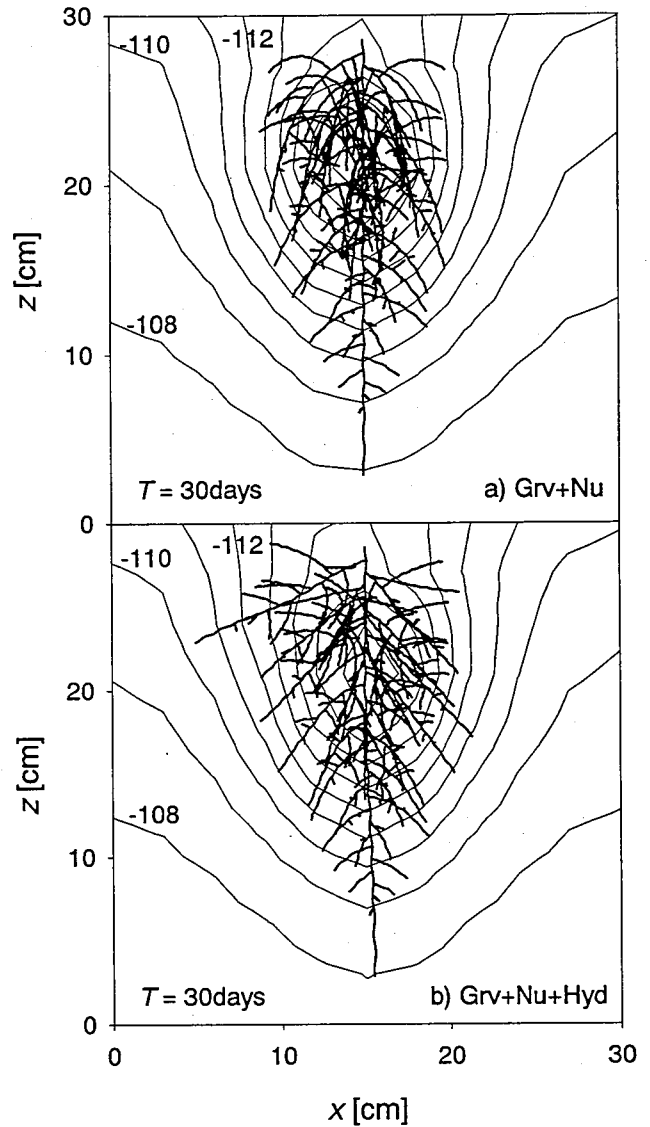


図1 水分屈性の有無による根系形状の違い

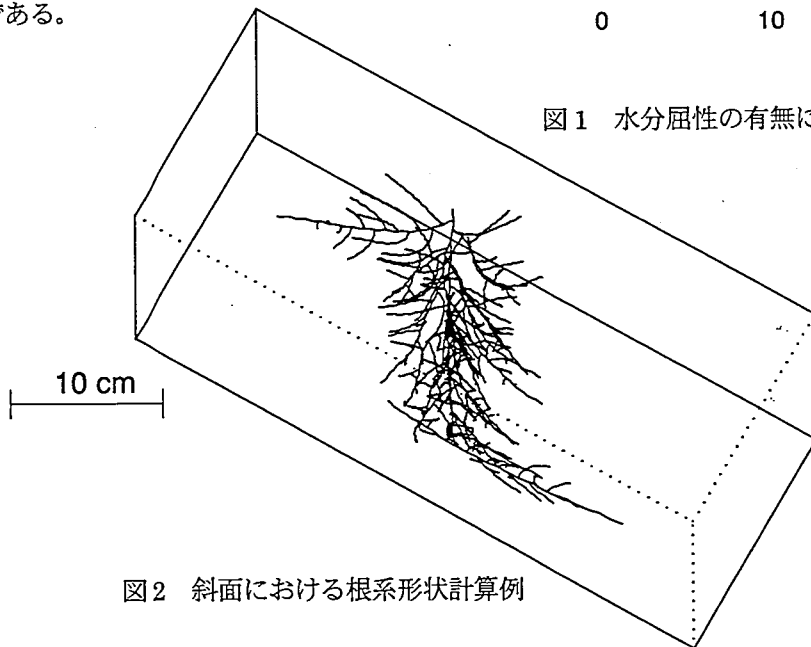


図2 斜面における根系形状計算例

引用文献

Clausnitzer V. and Hopmans J. W. 1994 Simultaneous modeling of transient three-dimensional root growth and soil water flow. *Plant and Soil* 164, 299-314; 堤大三・山寺喜成・宮崎敏孝・小杉賢一朗・水山高久、日本緑化工学会誌 Vol.26, No.4, p.309-319, 2001; Herkelrath W. N., Miller E. E., Gardner W. R. 1977 Water uptake by plants: II. The root contact model. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 41, 1039-1042