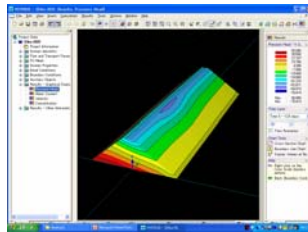


HYDRUSにおける 根の吸水モデルと今後の課題

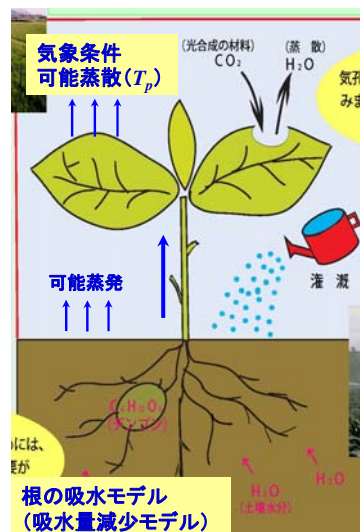


諸泉利嗣

岡山大学保健環境センター環境安全部門

根の吸水モデルの概念

- ◆ 土-植物-大気連続系 (SPAC) における水の流れは、生理学的な作用を無視した、全く物理学的な現象として考えられ、植物の地上部での蒸散が吸水能力として規定され、その条件に従って地下部での根の吸水が誘発されるという概念でモデルが構築されている。
- ◆ HYDRUSで使用されている根の吸水モデルは、土がある気象条件下で植物の要求水量を供給できなくなるときの、可能蒸散量に対して (実) 蒸散量が減少する過程を表現する。



根の吸水モデル

根の吸水:

土中の水分環境, 実蒸散の推定

実蒸散に与える溶質の影響, 根による溶質吸収

- ◆ Richards式 (1次元):

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left(K \frac{\partial h}{\partial z} \right) + \frac{\partial K}{\partial z} - S \quad (1)$$

h : 圧力水頭[L], θ : 体積含水率 [L^3L^{-3}], t : 時間[T], z : 鉛直座標[L], K : 飽和透水係数[LT^{-1}], S : 植物根からの吸水強度 [$L^3L^{-3}T^{-1}$]である.

根の吸水強度 S は, 植物の根による単位時間, 単位体積あたりの吸水量と定義される。

- ◆ Feddesら (1978) は, 吸水強度 S を最大吸水能 S_p [$L^3L^{-3}T^{-1}$] と吸水強度の制限因子となる圧力水頭の無次元吸水関数 $\alpha(h)$ (水ストレス応答関数) の積として, 次式で表している。

$$S(h) = \alpha(h)S_p, \quad 0 \leq \alpha(h) \leq 1 \quad (2)$$

- ◆ S_p は気象条件のみで決まる可能蒸発散速度 T_p [LT^{-1}] の関数として

$$S_p = b(z)T_p \quad (3)$$

で与えられる。 $b(z)$ [L^{-1}] は正規化された根密度分布であり, 根群域を深さ方向に積分すると1になる。

- ◆ 作物の実蒸散速度 T_a は, 吸水モデルで仮定された式(2)の吸水強度 S を根群域で積分して次式で与えられる。

$$T_a = \int_{L_r} S dz = T_p \int_{L_r} \alpha(h)b(z) dz \quad (4)$$

ここでは, 作物体内における水分の貯留量は T_a に対して無視できるもの仮定している。

- HYDRUSにおける実蒸散速度とは, 計算値であり, 測定値ではないことに注意してほしい。

吸水関数 α

(1) Feddesの

Feddesモデル

に依存して与

P_0 : 根が土か

P_{opt} : 根によ

P_2H : 可能蒸

力水頭

P_2L : 可能蒸

根によ

下限の

P_3 : 根が吸水

圧力水頭

HYDRUSでは

するこれらの

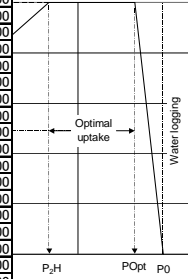
データベース

	P_0	P_{opt}	P_2H	P_2L	P_3
Potatoes [Wesseling,1992]	-10	-25	-320	-600	-16000
Sugar Beet [Wesseling,1991]	-10	-25	-320	-600	-16000
Wheat [Wesseling,1991]	0	-1	-500	-900	-16000
Pasture [Wesseling,1991]	-10	-25	-200	-800	-8000
Corn [Wesseling,1991]	-15	-30	-325	-600	-8000
Alfalfa [Taylor and Ashcroft,1972]	-15	-30	-1500	-1500	-8000
Beans ditto	-15	-30	-750	-2000	-8000
Cabbage	-15	-30	-600	-700	-8000
Canning Peas	-15	-30	-300	-500	-8000
Celery	-15	-30	-200	-300	-8000
Grass	-15	-30	-300	-1000	-8000
Lettuce	-15	-30	-400	-600	-8000
Tobacco	-15	-30	-300	-800	-8000
Sugar Cane-tensiometers	-15	-30	-150	-500	-8000
Sugar Cane-blocks	-15	-30	-1000	-2000	-8000
Sweet Corn	-15	-30	-500	-1000	-8000
Turfgrass	-15	-30	-240	-360	-8000
Onions-early growth	-15	-30	-450	-550	-8000
Onions-bulbing time	-15	-30	-500	-650	-8000
Sugar Beets	-15	-30	-400	-600	-8000
Potatoes	-15	-30	-300	-500	-8000
Carrots	-15	-30	-550	-650	-8000
Broccoli-early	-15	-30	-450	-550	-8000
Broccoli-after budding	-15	-30	-600	-700	-8000
Cauliflower	-15	-30	-600	-700	-8000
Lemons	-15	-30	-400	-400	-8000
Oranges	-15	-30	-200	-1000	-8000
Deciduous Fruit	-15	-30	-500	-800	-8000
Avocados	-15	-30	-500	-500	-8000
Grapes-early seasons	-15	-30	-400	-500	-8000
Grapes-during maturity	-15	-30	-1000	-1000	-8000
Strawberries	-15	-30	-200	-300	-8000
Cantaloupe	-15	-30	-350	-450	-8000
Tomatoes	-15	-30	-800	-1500	-8000
Bananas	-15	-30	-300	-1500	-8000
Corn-vegetative period	-15	-30	-500	-500	-8000
Corn-during ripening	-15	-30	-8000	-12000	-24000
Small Grains-vegetative period	-15	-30	-400	-500	-24000
Small Grains-during ripening	-15	-30	-8000	-12000	-24000

の圧力水頭示す。

頭。

下限の圧



r_2H : P_2H を与える可能蒸散速度 (LT^{-1}) (ここでは0.5 cm/dayに設定).

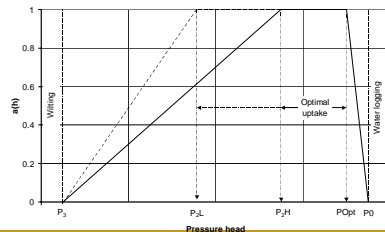
r_2L : P_2L を与える可能蒸散速度 (LT^{-1}) (ここでは0.1 cm/dayに設定).

この2つの入力パラメータにより, P_2 を可能蒸散量の関数として変数として与えることが可能となる(より高い蒸散量では P_2 は増加する)。HYDRUSでは, この入力した可能蒸散量の上下限值に対して, 下に示す線形補間によって P_2 を決定する。

$$r_2L < T_p < r_2H \text{ のとき } h = P_2H + \frac{P_2L - P_2H}{r_2H - r_2L} (r_2H - T_p) \quad (5)$$

$$T_p < r_2L \text{ のとき } h = P_2L$$

$$T_p > r_2H \text{ のとき } h = P_2H$$



(2) S型関数モデルのパラメータ

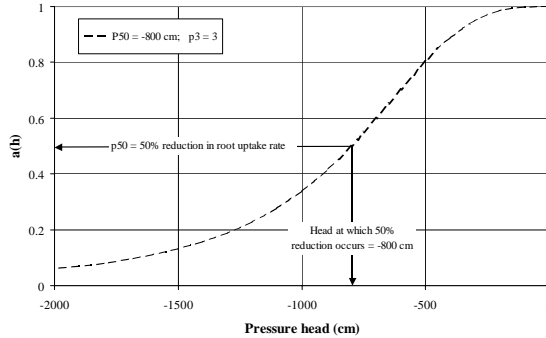
van Genuchten (1987)は、Feddesモデルを拡張し、水ストレスだけでなく、塩ストレスに対しても適用できるストレス応答関数として、S型関数モデルを提案した。

Additive model:

$$\alpha(h, h_{\phi}) = \frac{1}{1 + \left(\frac{h + h_{\phi}}{h_{50}} \right)^p} \quad (6)$$

Multiplicative model:

$$\alpha(h, h_{\phi}) = \frac{1}{1 + \left(\frac{h}{h_{50}} \right)^{p_1}} \frac{1}{1 + \left(\frac{h_{\phi}}{h_{\phi 50}} \right)^{p_2}} \quad (7)$$



h_{ϕ} : 浸透ポテンシャル (= a_c), h_{50} : 吸水量が可能蒸散速度の半分になる圧力水頭,

$h_{\phi 50}$: 吸水量が可能蒸散速度の半分になる浸透ポテンシャル

$p, p_1, p_2, h_{50}, h_{\phi 50}$: パラメータ

7

HYDRUSにおける根の吸水モデル設定の流れ

The flowchart illustrates the sequence of dialog boxes for setting the root water uptake model in HYDRUS:

- Main Processes**: Selects simulation options like 'Water Flow', 'Solute Transport', and 'Root Growth'.
- Root Growth Parameter - Logistic Growth Function**: Sets parameters for root growth, such as 'From Given Data', 'Initial Root Growth Time', 'Harvest Time', 'Initial Rooting Depth', 'Maximum Rooting Depth', and 'Exponential Depth Distribution Coeff.'.
- Root Water Uptake Model**: Chooses the model type (Feddes, S-Shape, Additive, Multiplicative, Threshold) and sets 'Sol. No.' and 'Root'.
- Root Water Uptake Parameters**: Configures Feddes' parameters (P0, P0pt, P2H, P2L, P3, r2H, r2L) and selects a 'Database'.

8

使用上の課題

1. 根密度の分布

HYDRUS (-1D) では、次の4種類の根密度分布を設定できる。

- (a) 深さによらず一定で与える
- (b) 深さとともに直線的に変化するように与える
- (c) 計算期間中根密度分布が一定の場合は、任意形状の分布を与える
- (d) 根が生長する場合は指数関数モデルで与える

(a)と(b)は、根密度分布の入手が困難な場合の植生を考慮した解析に便利であると考えますが、現象をどこまで正しく表しているか不明瞭さが残る。また、長期的な解析の場合、根密度分布の形状が変化しないという仮定には無理がある。このことは(c)にも言える。

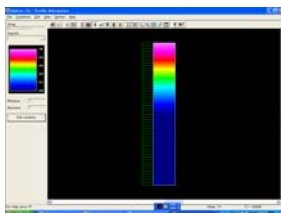
(d)は現象をかなり正確に表現できると考えるが、必要なパラメータが多くなり、現象に忠実であろうとした場合、パラメータの決定に困難さが残る。

いずれの分布も一長一短ではあるが、最終的には、利用できる根密度分布情報の有無によって、どの根密度分布を利用するかが決まる。

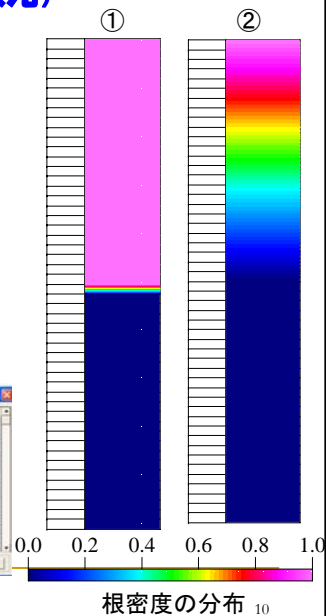
9

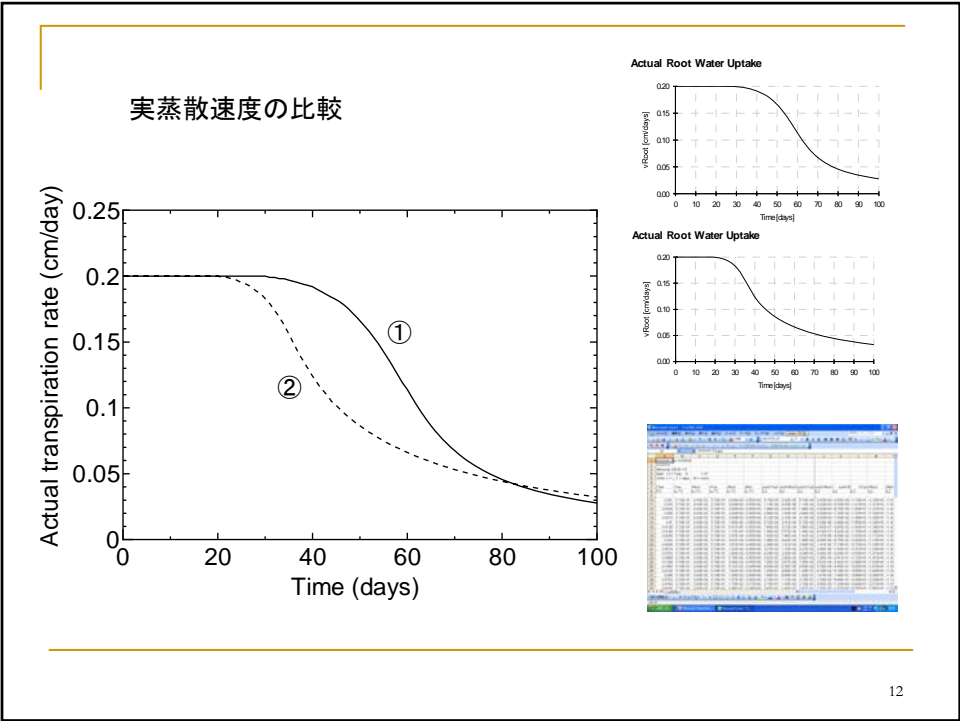
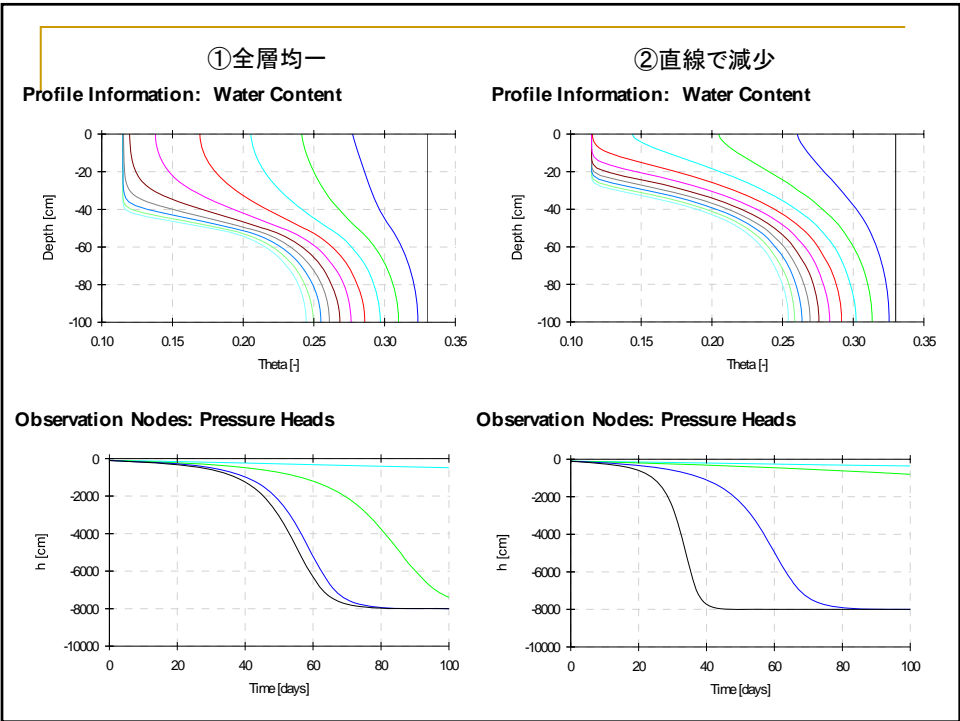
計算例その1 根密度の違い(1次元)

- 計算条件: ・土性: Silt loam
- ・初期条件: 全層(100cm) -100cm
 - ・可能蒸散速度: 0.2cm/day
 - ・下端境界: 自由排水
 - ・計算期間: 100日間
 - ・根密度分布: ①全層で均一
②地表面で最大(1),
下端で最小(0),
直線で減少



Time	Precip	Evap	NCIRA	Transp
1	0	0.07	10000	0.03
2	0	0.06	10000	0.04
3	0	0.05	10000	0.05
4	0	0.04	10000	0.07
5	0	0.03	10000	0.09
6	0	0.02	10000	0.11
7	0	0.01	10000	0.13
8	0	0.00	10000	0.15
9	0	0.00	10000	0.17
10	0	0.00	10000	0.19
11	0	0.00	10000	0.21
12	0	0.00	10000	0.23
13	0	0.00	10000	0.25
14	0	0.00	10000	0.27
15	0	0.00	10000	0.29





根密度分布関数

$$(1)\text{HYDRUS-1D: } b(x) = a^* e^{-a^*(L-x)} \quad (8)$$

$$L_R(t) = L_m \frac{L_0}{L_0 + (L_m - L_0)e^{-rt}} \quad (9)$$

a^* : フィッティングパラメータ, L : 地表面の x 座標, L_m : 根の最大深さ, L_0 : 生育期初期の根の深さ, r : 根の成長率

(2)HYDRUS-2D/3D:

$$b(x, z) = \left(1 - \frac{x}{X_m}\right) \left(1 - \frac{z}{Z_m}\right) e^{-\left(\frac{p_x}{X_m}|x^* - x| + \frac{p_z}{Z_m}|z^* - z|\right)} \quad (10)$$

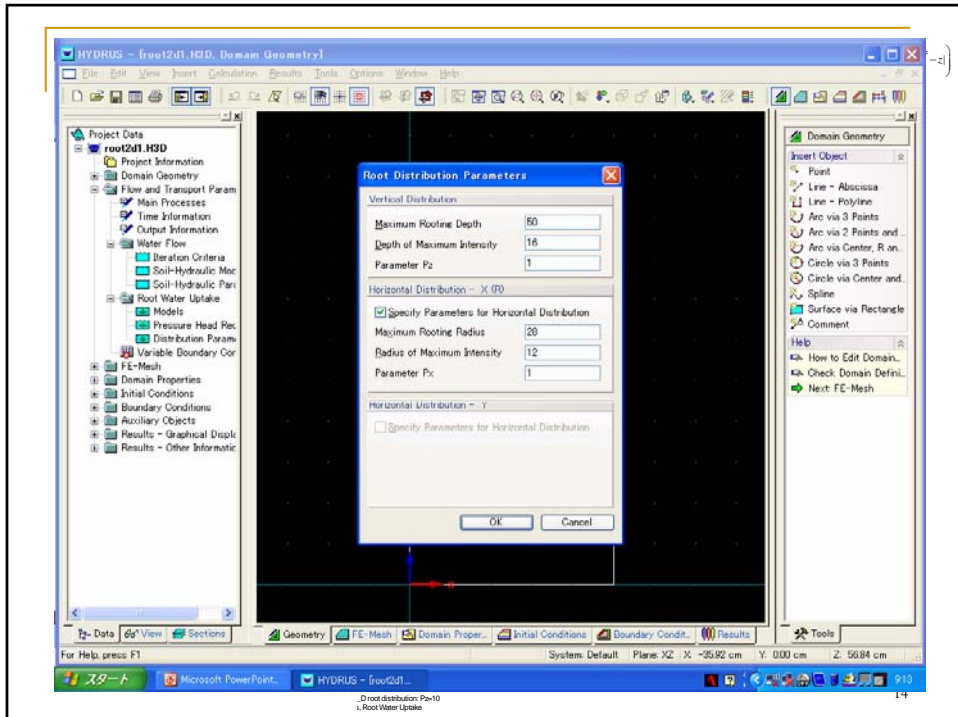
軸対称流れ

$$b(x, y, z) = \left(1 - \frac{x}{X_m}\right) \left(1 - \frac{y}{Y_m}\right) \left(1 - \frac{z}{Z_m}\right) e^{-\left(\frac{p_x}{X_m}|x^* - x| + \frac{p_y}{Y_m}|y^* - y| + \frac{p_z}{Z_m}|z^* - z|\right)} \quad (11)$$

X_m, Y_m, Z_m : 根が存在する最大位置

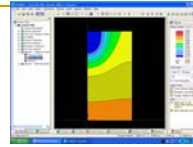
$x^*, y^*, z^*, p_x, p_y, p_z$: フィッティングパラメータ (x^*, y^*, z^* は、吸水量が最大となる位置)

13

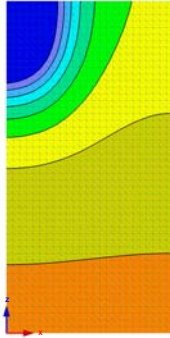


14

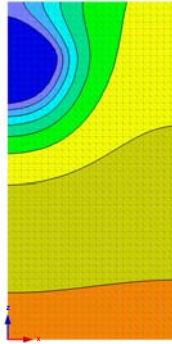
土壌水分量の分布



① $p_z=1$



② $p_z=10$



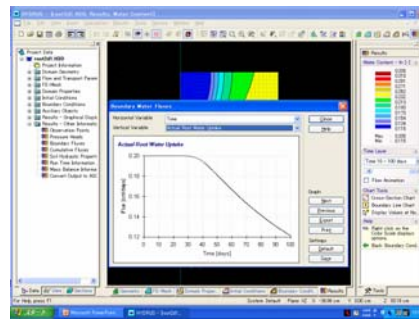
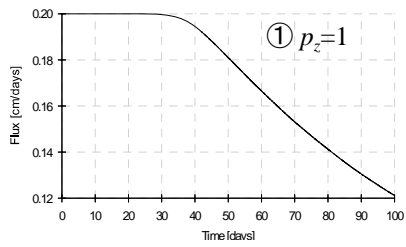
③ $p_z=0$



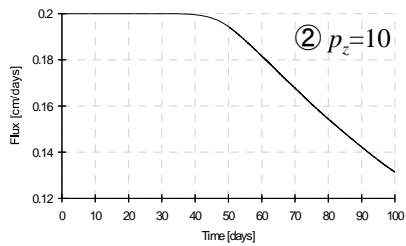
!_D root distribution: Pz=10
interk. Time 10- 100 days

実蒸散フラックス

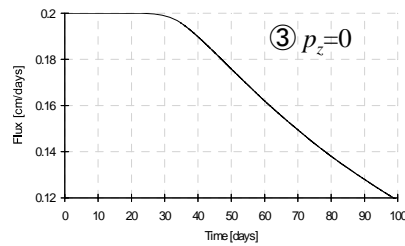
Actual Root Water Uptake



Actual Root Water Uptake



Actual Root Water Uptake



2. 蒸発散の配分

根の吸水項を考慮した式(1)を解くにあたり、土壌面からの可能蒸発速度および植物からの可能蒸散速度を境界条件として指定する必要がある。圃場において可能蒸発速度と可能蒸散速度が個別に測定されることは稀で、通常は、微気象観測や最寄りの気象観測所の気象データからPenman式等を用いて可能蒸発散速度を推定することが多い。

可能蒸発散(ET_p)をどのように可能蒸散(T_p)と可能蒸発(E_p)に配分するかが問題となる。

比較的簡単な方法としては、葉面積指数(Leaf Area Index)を利用する方法がある(Ritchie, 1972; Campbell, 1987)。

葉面積指数は、単位土地面積当たりが存在する葉の総面積[L²L⁻²]で、植物群落の特性を規定するのによく使用される。

17

$$(1) \text{ Ritchie (1972): } E_p = \frac{\Delta}{\Delta + \gamma} \frac{R_n}{L} \exp(-0.39LAI) \quad (12)$$

R_n : 純放射量, Δ : 飽和水蒸気曲線の傾き, γ : 乾湿計係数, L : 水の蒸発潜熱

$$(2) \text{ Campbell (1987): } T_p = ET_p \{1 - \exp(-0.82LAI)\} \quad (13)$$

$$(3) \text{ 作物係数法: } T_p = K_c ET_p \quad (14)$$

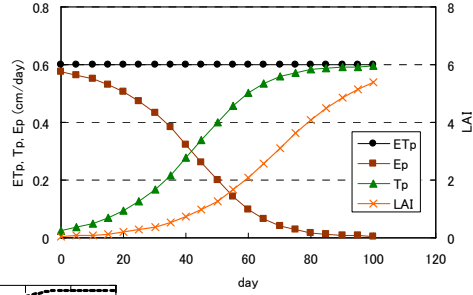
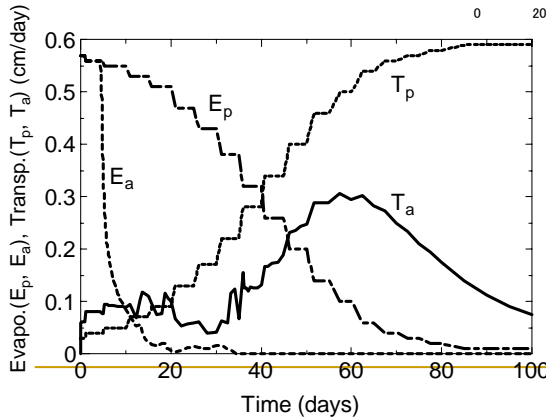
K_c : 作物係数, 生育段階で変化

$$ET_p = T_p + E_p \quad (15)$$

18

計算例その3

ET_p を(2)の方法を用いて T_p と E_p に配分した場合(1D):



$$b(x) = a^x e^{-a^x(L-x)}$$

$$L_R(t) = L_m \frac{L_0}{L_0 + (L_m - L_0)e^{-rt}}$$

Root Growth Parameter - Logistic Growth Function

Root Growth Factor
 From Given Data
 50% after 50% Growing season

Root Growth Data
 0 Initial Root Growth Time
 100 Harvest Time
 0.01 Initial Rooting Depth
 100 Maximum Rooting Depth
 Time - Root Data
 Depth - Root Data

Exponential Depth Distribution Coeff: 0.105

OK Cancel Previous Next Help

まとめ

- (1) 根密度分布の与え方
- (2) 可能蒸発散の可能蒸散と可能蒸発への配分
- (3) FeddesモデルとS型関数モデルに必要なパラメータの決定。
 Feddesモデルについては、HYDRUSに組み込まれているデータベースの値をできる限り利用するのが良いと考える。
 S型関数モデルに関しては、パラメータの決定が必要である。
- (4) r2H, r2Lの決定方法
- (5) 植物による降雨遮断
- (6) 解析モデル全般に言えることだが、モデルが精密になればなるほど、必要なパラメータが多くなり、パラメータの決定や調整に多くの労力を要するようになる。これは、エンドユーザーの立場からは、使いにくい解析ツールになってしまうかもしれない。解析の目的、要求される精度、利用できる植生情報の有無を考慮してHYDRUSを利用することが、エンドユーザーの心得としては大事である。

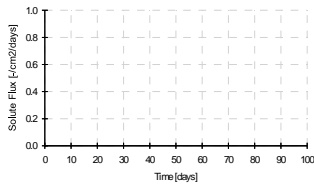
計算例おまけ S型関数モデル-Additive-

$$\alpha(h, h_p) = \frac{1}{1 + \left(\frac{h + h_p}{h_{50}}\right)^p}$$

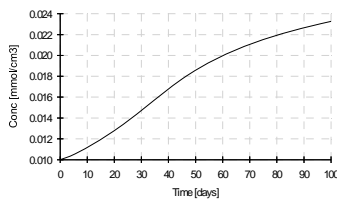
溶質の初期の濃度: 0.01 mmol/cm³

①根による塩の吸収無し

Root Solute Uptake

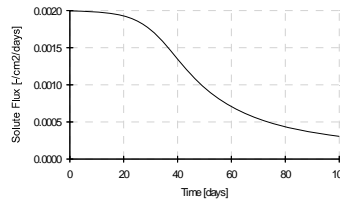


Root Zone Concentration

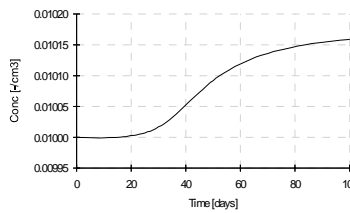


②根による塩の吸収有り

Root Solute Uptake



Root Zone Concentration



21

参考文献

- Feddes, R.A., Kowalik, P.J., and Zarandny (1978): Simulation of field water use and crop yieldm John Wily & Sons, New York, NY.
- van Genuchten, M.Th. (1987): A numerical model for water and solute movement in and below the root zone, Research Report N.121, U.S.Salinity Laboratory, USDA-ARS, Riverside, California.
- 筑紫二郎(1995): 植物の水環境と土壌-植物-大気系の水の流れ, 農土論集, 180, 153-159.
- 靱井和朗・野坂治朗・矢野友久(1992): 植物の根による吸水モデルに関する比較検討, 水文・水資源学会誌, 5(3), 13-21.
- HYDRUSのテクニカルマニュアル

22