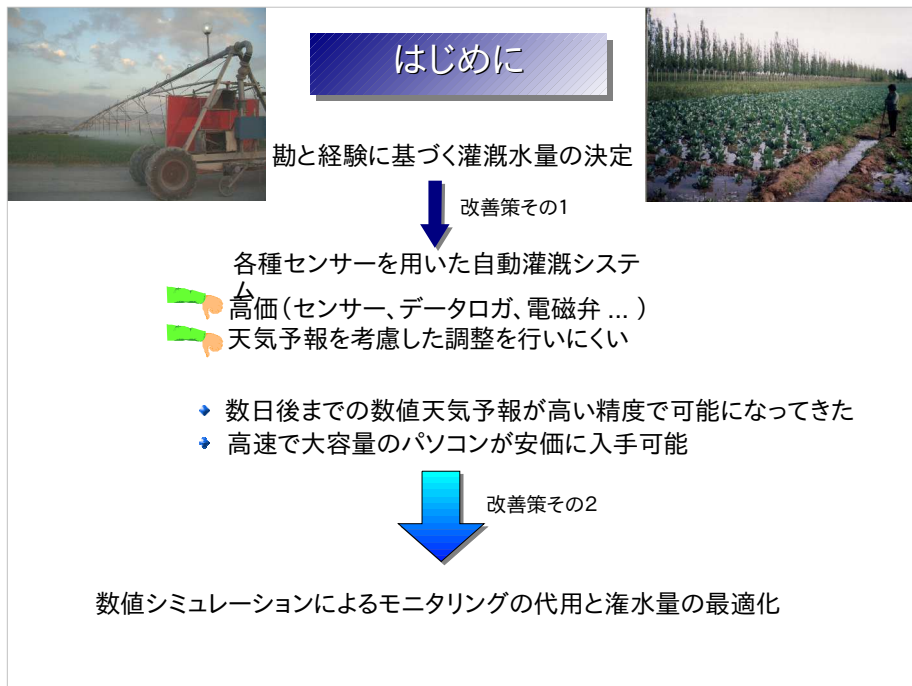


植物の成長モデルと 灌漑スケジューリング への応用

筑波大学大学院生命環境科学研究科

藤巻晴行



灌水量の最適化

灌漑の目的: 純収入の最大化

灌漑スケジューリング {
 タイミング: 自由度小さい
 灌水量: 比較的自由

期間内の純収入 (N_r)

$$N_r = P_c \epsilon \int T dt - P_w \int q_i dt - C_{ot}$$

P_c : 作物価格 (\$ kg⁻¹ DM)

ϵ : 水利用効率

T : 蒸散速度 (cm s⁻¹ = 10³ kg a⁻¹ s⁻¹)

P_w : 水価格 (\$ kg⁻¹)

q_i : 灌水フラックス (cm s⁻¹)

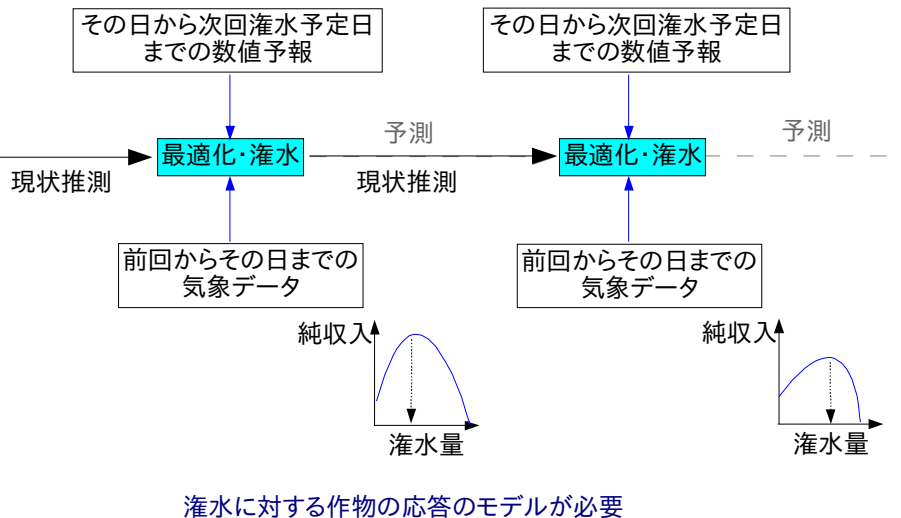
C_{ot} : その他の費用 (\$ a⁻¹)

その期間内に実現した乾物生産量の増分に比例して収入が得られたと仮定して最適化

仮定: 販売部位の数量は乾物生産量に比例

最適化のアルゴリズム: 黄金分割法

新しい灌漑水量の決定法



水移動の基礎式

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = - \left(\frac{\partial q_l}{\partial z} + \frac{\partial q_v}{\partial z} \right) - S$$

$$q_l = -K \left(\frac{\partial \psi}{\partial z} - 1 \right)$$

$$q_v = -a \tau \rho_w^{-1} D_{va} h_r \eta \frac{\partial \rho_{vsat}}{\partial T} \frac{\partial T_s}{\partial z} - a \tau \rho_w^{-1} D_{va} h_r \frac{\rho_{vsat}}{R_v T_s} \frac{\partial \psi}{\partial z}$$

成層土壌とヒステリシスを考慮

- θ : 体積含水率 (cm³/cm³)
- t : 時間 (s)
- z : 深さ (cm)
- q_l : 液状水フラックス (cm/s)
- q_v : 水蒸気フラックス (cm/s)
- ϕ : 圧力水頭 (cm)
- K : 不飽和透水係数 (cm/s)
- S : 植物根による吸水速度 (s⁻¹)
- a : 気相率 (cm³/cm³)
- τ : 屈曲度
- ρ_w : 水の密度 (g/cm³)
- ρ_{vsat} : 飽和水蒸気濃度 (g/cm³)
- h_r : 相対湿度
- D_{va} : 空気中の水蒸気拡散係数 (cm²/s)
- η : 温度勾配による水蒸気拡散の補正係数

溶質移動の基礎式

$$\frac{\partial (\theta C)}{\partial t} = - \frac{\partial}{\partial z} \left(-\theta D \frac{\partial C}{\partial z} + q_l C \right)$$

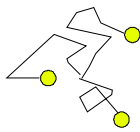
$$D = D_i + D_m$$

$$D_i = D_{iw} \tau_s$$

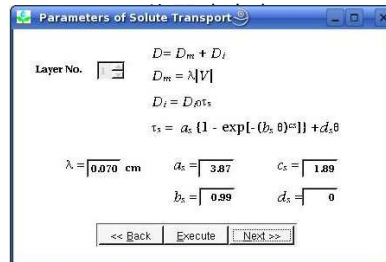
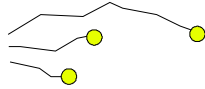
$$D_m = \lambda |V|$$

- C : 溶質濃度 (mg/cm³)
- D : 分散係数 (cm²/s)
- D_i : 拡散係数 (cm²/s)
- D_m : 物理的分散係数 (cm²/s)
- D_{iw} : 水中の拡散係数 (cm²/s)
- τ_s : 屈曲度 (0~1)
- λ : 分散長 (cm)

拡散



物理的分散



熱移動の基礎式

$$C_{hs} \frac{\partial T_s}{\partial t} = -\frac{\partial q_h}{\partial z} - L \rho_w \frac{\partial q_v}{\partial z}$$

$$q_h = -k_h \frac{\partial T_s}{\partial z} + C_{hw} T_s q_l$$

上部境界条件

$$\begin{aligned} q_{h0} &= R_n - H - L q_{v0} + C_{hw} T_w q_{l0} \\ &= (1 - \alpha_r) R_a + R_l - L q_{v0} \\ &\quad - C_{ha} \frac{T_{s0} - T_a}{r_a} + C_{hw} T_w q_{l0} \end{aligned}$$

C_{hs} : 土壌の体積熱容量 (J/(cm³K))

C_{hw} : 液状水の体積熱容量 (4.18J/(cm³K))

C_{ha} : 空気の体積熱容量 (J/(cm³K))

q_h : 顕熱フラックス (W/cm²)

R_a : 短波放射フラックス (W/cm²)

R_l : 正味長波放射フラックス (W/cm²)

L : 水の蒸発潜熱 (J/g)

k_h : 土壌の熱伝導率 (W/(cmK))

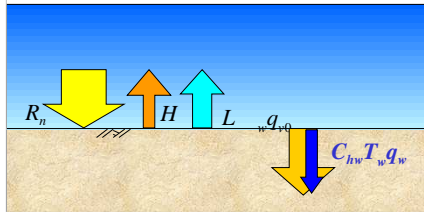
α_r : アルベド

T_a : 基準高度における気温 (K)

T_w : 浸潤水もしくは地表面の温度 (K)

r_a : 空気力学的抵抗 (s/cm)

添字0は地表面の値



数値計算法

水移動: 修正 Picard 型差分法 (Celia, 1990)

溶質・熱移動: 陰解型差分法

空間増分: 上端と下端の厚さを設定し、その間をほぼ等比数列に近い値に自動設定

時間増分: 水収支の精度が低くならないよう配慮しながらなるべく長くなるように自動調節

根群分布の関数表現

$$\beta = (b+1) d_r^{-b-1} (d_r - z)^b$$

β : 根群活性係数(根群分布) (cm⁻¹)

b : 植物固有のパラメータ

d_r : 根群下端の深さ (cm)

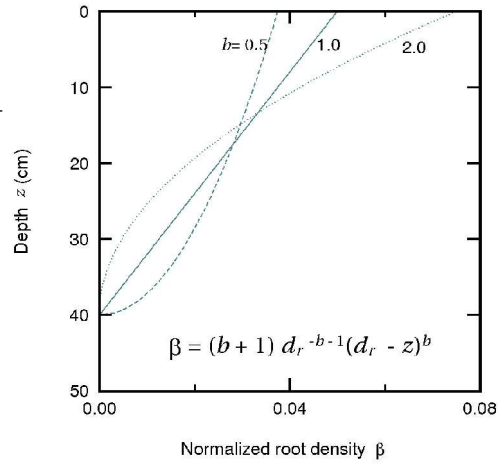


Fig.1 Examples of normalized root density profile

植物の成長

根群下端の深さ (d_r)

$$d_r = a_{dr} \left[1 - \exp \left(b_{dr} \int T dt \right) \right] + c_{dr}$$

a_{dr} , b_{dr} , c_{dr} : 植物固有のパラメータ

T : 蒸散速度 (cm/s)

葉面積指数 (I)

$$I = a_{LAI} \left[1 - \exp \left(b_{LAI} \int T dt \right) \right]$$

a_{LAI} , b_{LAI} : 植物固有のパラメータ

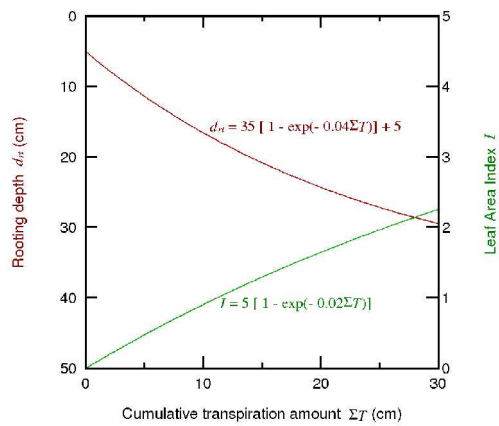


Fig.2 Examples of rooting depth and leaf area index as functions of cumulative transpiration amount

蒸散速度

可能蒸散速度 (T_p)

$$T_p = E_p K_c$$

E_p : Penman 式による蒸発散位 (cm/s)

K_c : 蒸散に関する作物係数

$$K_c = a_{kc} [1 - \exp(-b_{kc} \int T dt)] + c_{kc}$$

a_{kc} , b_{kc} : 植物固有のパラメータ

実蒸散速度 (T)

$$T = \int_0^{dr} S dz$$

$$S = T_p \beta \alpha_w \alpha_s$$

α_w : 水ストレスに関する減少係数

α_s : 塩ストレスに関する減少係数

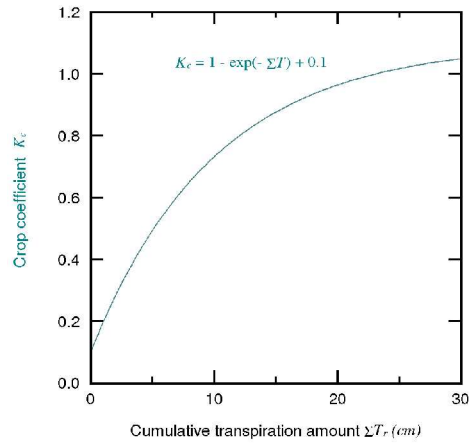


Fig.3 An example of crop coefficient as a function of cumulative transpiration amount

蒸発速度

$$E = \frac{\rho_{vs}^* h_{rs} - \rho_{va}^* h_{ra}}{r_a}$$

E : 土壌面蒸発速度 ($\text{g}/(\text{cm}^2\text{s})$)

ρ_v : 水蒸気濃度 (g/cm^3)

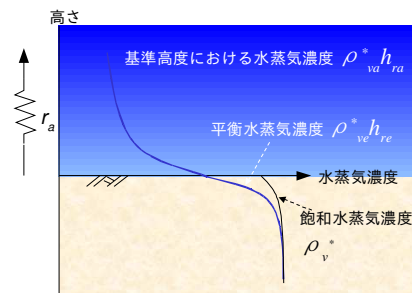
h_r : 相対湿度

上付 *: 飽和値

下付 s: 土壌面の値

下付 a: 基準高度における
空気中の値

r_a : 空気力学的抵抗 (s/cm)



植物の成長が土壌面蒸発に与える影響

$$R_s = R_{sc} \exp(-a_{Rs} I)$$

R_{sc} : 群落上面の R_s

a_{Rs} : 植物固有のパラメータ

$$r_a = r_{a0}(1 + a_{ra} I)$$

r_{a0} : 裸地の場合の r_a

a_{ra} : 植物固有のパラメータ

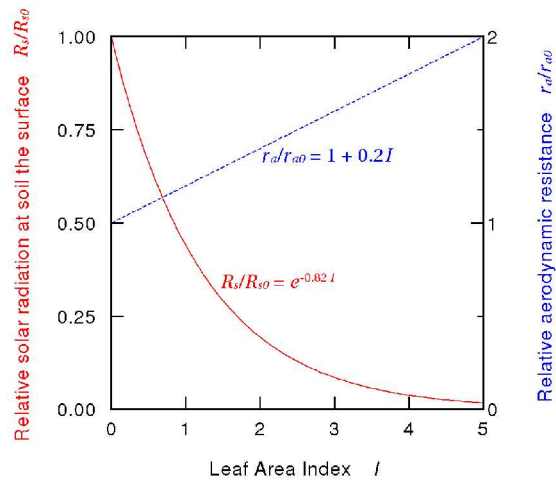


Fig.4 Assumed effects of leaf area on solar radiation and aerodynamic resistance at soil the surface

デモンストレーション その1: 条件設定

想定するシナリオと条件

- ✦ 7/29 に塩分濃度が 1.0 mg cm^{-3} の灌漑水で大量の灌水
→ $\theta(z, 0) = -100\text{cm}$, $C(z, 0) = 1.0 \text{ mg cm}^{-3}$
- ✦ 8 日後 (8/6 の朝)、過去 1 週間分の気象条件をダウンロードして数値解析を行い、現状推測
- ✦ 次に今後 1 週間分の数値予報をダウンロードして灌水量を最適化
- ✦ 初期 (7/30 0:00) の積算蒸散量 = 10cm
- ✦ 土壌特性: マサ土の実測値
- ✦ ストレス応答関数: $-4,000\text{cm}$ で吸水速度が半減
- ✦ $P_c = 2 \text{ kg}^{-1}$ 、 $\varepsilon = 0.001$ 、 $P_w = 0.0001 \text{ kg}^{-1}$ 、 $C_{ot} = 0$
- ✦ 灌漑開始: 8/6 9:00
灌漑強度 = 1.0 cm h^{-1}
- ✦ 気象条件: 昨年の 7/30 から 8/13 までのつくば市での観測値

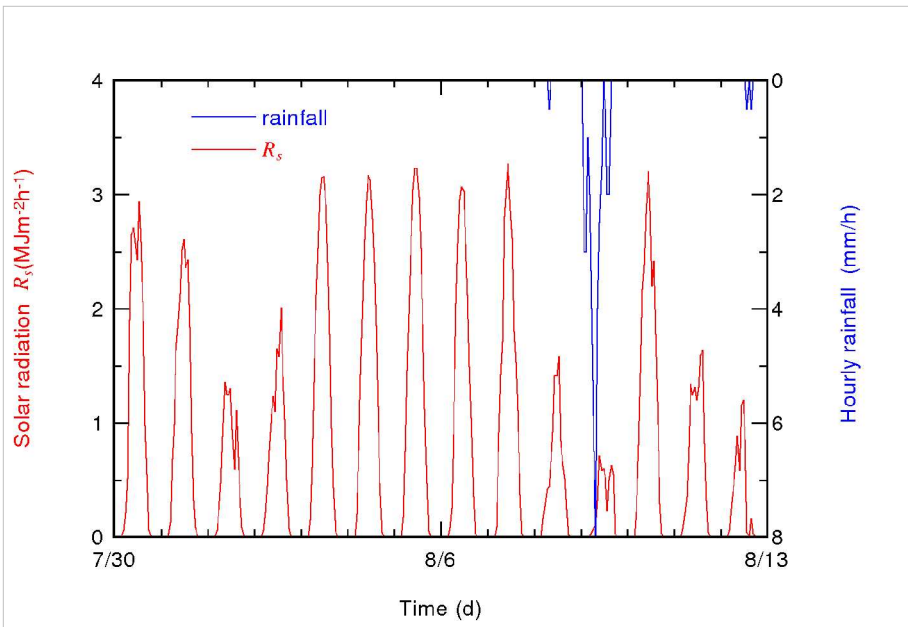


Fig.5 Solar radiation and rainfall during the numerical experiment (Tsukuba, 2006)

デモンストレーション その2 : 結果と考察

- 1 週間 (7/30 - 8/6) の
 積算蒸散量 = 0.93cm
 積算蒸発量 = 1.70cm
 $\int_0^{d_{rt}} (\theta_{fc} - \theta) dz = 2.8 \text{ cm}$

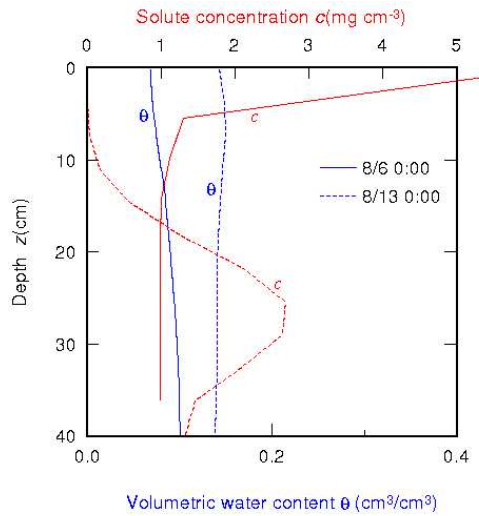


Fig.6 Profiles of water content and solute concentration

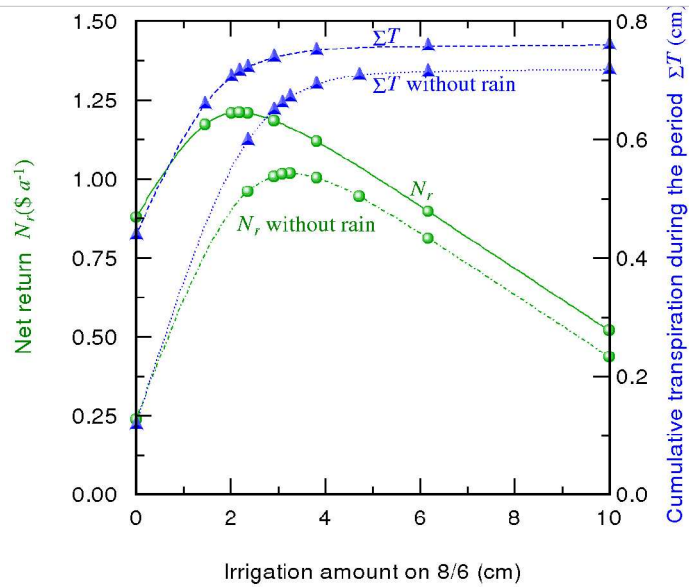


Fig.7 Net return and transpiration amount as functions of irrigation amount

今後の課題

- ◆ 植物のパラメータ値はいずれも架空の値
 - 今後、それらの測定を行い、実際の灌漑スケジュールにおける成績を検証する必要
- ◆ モデルがまだ単純過ぎる(根の動的生長、施肥の影響などを無視)
 - サブモデルを順次改良・追加
- ◆ 大型の作物に対しては多次元が望ましい
- ◆ 局所数値予報はまだ公開されていない(?)
 - 週間予報(降水確率と最高最低気温)からどのように予期される気象データを推測するか
- ◆ 各圃場の平均的な土壌特性の安価で高精度な測定法の確立とその事業化
- ◆ 講習もしくは計算サービスの事業化



Thank you