

加温用埋設管周辺土壌の乾き上がりについて

金沢大学工学部 正員 関 平和

金沢大学工学部 正員 小森友明

金沢大学大学院 ○梶川 誠

1. 緒言 近年、放射性廃棄物の地中埋設処分などに関連し、不飽和土壌内の熱・水分同時移動問題が注目されているが、この問題は単に工学分野に限られたものではない。本研究では、農業上の問題の一つである栽培土壌加温時の温水管周辺土壌の熱・水分移動問題を取り上げ、想定された加温設備配管のレイアウトの下で、土壌加温を行う際の土壌内の温度分布、含水比分布を、別報の手法³⁾に基づいて算出し、主として管壁周辺の土壌の乾き上がり³⁾に焦点を絞って考察した。

2. 不飽和土壌内の熱・水分同時移動と温水管近傍の土壌の乾き上りのメカニズムについて

不飽和土壌内では、温度勾配及び含水比勾配によって水分移動が起こる。水分は、液状水と水蒸気の二形態で存在し、それぞれ拡張されたDarcy則、拡散によって移動する。

すなわち、

$$(\text{液状水移動}) \quad q_L = -\rho_w D_{TL} \nabla T - \rho_w D_{wL} \nabla w - \rho_w k z \quad (1)$$

$$(\text{水蒸気移動}) \quad q_v = -\rho_{wv} D_{Tv} \nabla T - \rho_{wv} D_{wv} \nabla w \quad (2)$$

$$(\text{全水分移動量}) \quad q_{H_2O} = q_L + q_v = -D_T \nabla T - D_w \nabla w - \rho_w k z \quad (3)$$

$$\text{ただし} \quad \begin{cases} D_T = \rho_w D_{TL} + \rho_{wv} D_{Tv} \\ D_w = \rho_w D_{wL} + \rho_{wv} D_{wv} \end{cases} \quad (4)$$

$$(5)$$

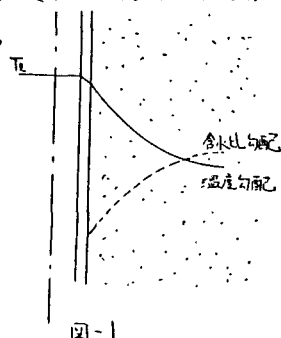


図-1

一方、熱移動流束は、温度勾配によって引き起こされる潜熱輸送をも含めた見掛けの熱伝導と、含水比勾配によって引き起こされる水蒸気移動に伴う潜熱移動を加えたものになる。

すなわち、

$$q = -K_{eff} \nabla T - L \rho_{wv} D_{wv} \nabla w \quad (6)$$

今、温水によって管から土壌に熱が伝わるとし、土壌内には図1のような温度勾配が形成される。通水管壁は、水分移動を完全に遮断するので、そこでの正味の水分流束は、0になる。従って、重力の影響が小さい場合、含水比は温度とは逆の勾配を持つことになる。言い換えれば、温度勾配によって管の外側へ向かって起こる水分移動量は、含水比勾配によって管の中心へ向かう水蒸気の移動量と釣り合うことになる。時に低含水比領域では、一般に D_w が著しく小さいので、管壁近傍の含水比低下が激しくなるものと予想される。

3. 解析モデル 解析の対象とした温水管配置のモデルを図2に示す。ここに示された寸法は、文献¹⁾から作物栽培現場の平均値と思われる値を用いた。また温水管は呼び径30の塩化ビニル管を用いるものとした。有限差分法による計算領域を図3に示す。ここでは解析断面を4領域に分け、温水管に近いほど、格子間隔が小さくなるように設定した。

4. 土壌内の熱・水分同時移動の基礎式。境界条件及び初期条件。 Philip & de Vries²⁾によれば、2次元的な土壌内の熱・水分同時移動の基礎式は次のごとく与えられる。

$$\begin{aligned} \rho_d \frac{\partial w}{\partial \theta} = & D_T \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) + \frac{\partial D_T}{\partial T} T \left[\left(\frac{\partial T}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial T}{\partial z} \right)^2 \right] \\ & + D_w \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right) + \frac{\partial D_w}{\partial w} w \left[\left(\frac{\partial w}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial w}{\partial z} \right)^2 \right] \\ & + \left(\frac{\partial D_T}{\partial w} T + \frac{\partial D_w}{\partial T} w \right) \left(\frac{\partial T}{\partial x} \frac{\partial w}{\partial x} + \frac{\partial T}{\partial z} \frac{\partial w}{\partial z} \right) \\ & + \rho_w \left(\frac{\partial k}{\partial T} \frac{\partial T}{\partial z} + \frac{\partial k}{\partial w} \frac{\partial w}{\partial z} \right) \end{aligned} \quad (7)$$

$$\begin{aligned} \rho_d C_p \frac{\partial T}{\partial \theta} + \rho_d C_w \left(w \frac{\partial T}{\partial \theta} + T \frac{\partial w}{\partial \theta} \right) \\ = K_{eff} \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) + \frac{\partial K_{eff}}{\partial T} T \left[\left(\frac{\partial T}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial T}{\partial z} \right)^2 \right] \\ + \frac{\partial K_{eff}}{\partial w} w \left[\frac{\partial T}{\partial x} \frac{\partial w}{\partial x} + \frac{\partial T}{\partial z} \frac{\partial w}{\partial z} \right] \end{aligned} \quad (8)$$

境界条件、初期条件は、

$$-D_T \frac{\partial T}{\partial z} - D_w \frac{\partial w}{\partial z} - \rho_w k = k_g (H_g - H_\infty) \quad (z=z_g) \quad (9)$$

$$-K_{eff} \frac{\partial T}{\partial z} = h_g (T - T_\infty) + k_g L (H_g - H_\infty) + h_r (T - T_\infty) \quad (z=z_g) \quad (10)$$

$$\frac{z-s}{R} \left(D_T \frac{\partial T}{\partial z} + D_w \frac{\partial w}{\partial z} + \rho_w k \right) + \frac{x}{R} \left(D_T \frac{\partial T}{\partial x} + D_w \frac{\partial w}{\partial x} \right) = 0 \quad (x^2 + (z-s)^2 = R^2) \quad (11)$$

$$-K_{eff} \left(-\frac{z-s}{R} \frac{\partial T}{\partial z} + \frac{x}{R} \frac{\partial T}{\partial x} \right) = U_p (T_k - T) \quad (x^2 + (z-s)^2 = R^2) \quad (12)$$

$$\frac{\partial T}{\partial x} = \frac{\partial w}{\partial x} = 0 \quad (x=0, x_g) \quad (13)$$

$$T = T_0 \quad (z=0) \quad (14)$$

$$w = w_0 \quad (z=0) \quad (15)$$

$$T = T_i \quad (\theta=0) \quad (16)$$

$$w = w_i \quad (\theta=0) \quad (17)$$

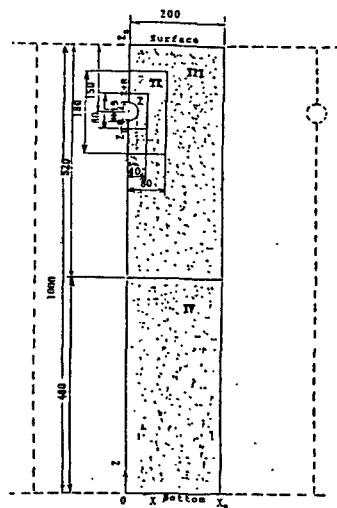
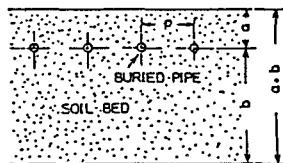


図-3 計算領域

5. 計算結果と考察。加温開始時から10日及び20日後の温度・含水比分布を各々、図4～7に示す。図によれば、大きな含水比降下は見られない。含水比の低下は、管近傍で徐々に起きているが、水分拡散係数 D_w が大きいために、周辺から管近傍に水分が補給され、含水比の低下はそれほど激しくないことがわかる。従って、ここで対象とした栽培土については、熱移動に及ぼす水分移動の影響はほとんどなく、熱移動を水分移動と独立に計算しても差し支えないと思われる。

6. 結語。本計算例では、土壌加温の際には、それほど大きな水分移動が起こらず、管壁近傍が乾き上がる心配はないという結果を得たが、更に保水特性の異なる土壌を対象とした検討を続行する予定である。



$$a=150, b=850, p=400 \text{ mm}$$

図-2 温水管配置モデル

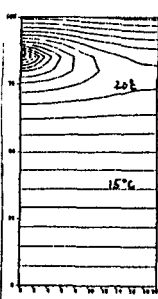


図-4 加温開始10日後の温度分布

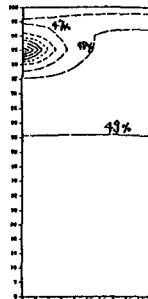


図-5 加温開始10日後の含水比分布

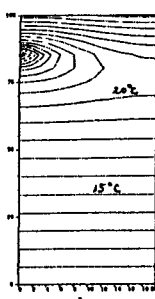


図-6 加温開始20日後の温度分布

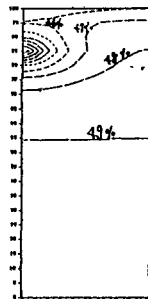


図-7 加温開始20日後の含水比分布

(文献)

1) 岡田益己, 1980: 暖房, 「温室設計の基礎と実例 (三原義秋編著)」, 養賢堂, 182-204

2) Philip, J.R. and de Vries, D.A., 1957: Trans American Geotechnical Union 38, 222-232

3) 関 平和・小森友明, 1985: 土木学会第40回年次学術講演概要集第3部, 747-748