

地温変動による地下空気流動に関する評価

Evaluation of Ground Air Flow by Soil Temperature Fluctuations

板津 透

株式会社 ヴィジブル インフォメーション センター

要旨(Abstract)

地温変動により引き起こされる地下空気流動を評価するため、地下空気圧変動の解析解、およびその解を用いて地表面における間隙流速の近似式を求めた。間隙流速近似式による検討から、大気圧変動による地下空気流動が小さい条件（大気が安定し土壌層が薄い）においてのみ、地温変動による地下空気流動が同程度になる可能性がある事を明らかにした。

キーワード：地下空気，地温変動，大気圧ポンピング

Key words: ground air, soil temperature fluctuations, barometric pumping

1. はじめに

地下空気（土壌，地層中の空気）と大気はその組成が異なり，その交換メカニズムは土壌物理学にとっても重要な課題である。地下空気中に含まれるガス成分の輸送に関する主なメカニズムとしては，移流，および分散（分子拡散を含む）がある。

ヒレル（1998）では，地下空気流動は，地下空気と大気の圧力差により起こり，圧力差は大気圧変動，温度勾配，風の息，降水浸透，地下水位変動，植物根による水分吸収などによって生ずるとされている。本発表では，従来は無視されていた「地温変動に起因する地下空気流動」について，解析解をもとに考察する。

2. 目的

地温変動による地下空気流動は，大気圧変動による流動と比べて小さい事が予測されるが，地温変動を無視するためには定量的な検討が必要である。そのため，地温変動による地下空気流動を求め，大気圧変動による地下空気流動と比較できるようにする。

3. 方法

本研究では，解析解を用いて地温変動による地下空気流動を評価する。地下空気流動は，地下空気圧の勾配から計算されるため，地下空気圧に関する解析解を求める。

地下空気圧に関する解析解として，大気圧変動による地下空気圧変動が求められている。この考え方を元にして，地温変動による地下空気圧変動に関する解析解を求める。

土壌，および水分の熱容量は，それぞれ空気の1000～2200倍および3200倍程度である事から，地下空気の移動による熱輸送量は地温にほとんど影響を与えないと考えられる。そのため，以下を仮定した。

- 1) 地下空気の移動は地温に影響を与えない。
- 2) 地下空気の温度は地温に等しい。

上記の仮定から，地下空気温度は，地下空気圧とは独立して，別個に求めた。

大気圧変動による地下空気流動の解析解は，以下の地下空気密度の保存式から求められる。なお， x は下向き鉛直方向とする。

$$\phi_a \frac{\partial \rho}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\rho k \partial p'}{\mu_a \partial x} \right) \quad (1)$$

p' ：地下空気圧 ρ ：地下空気の密度

ϕ_a ：空気間隙率 k ：固有透過度

μ_a ：空気の粘性係数

地下空気の密度に地下空気圧 p' ，および地下空温度 T' の影響を考慮した場合， $\rho \propto p'/T'$ となる。

式(1)に上記の関係を組み込んだ後，微分の2

次式であるため無視し、地下空気圧変動が地下空気圧の大きさに比べて小さい事を考慮すると式(2)になる。式(2)の右辺第2項が地温変動項になり、既存研究では右辺第2項が無い式が対象とされていた。

$$\frac{\partial p}{\partial t} = \kappa_p \frac{\partial^2 p}{\partial x^2} + \frac{p_{avg}}{T_{avg}} \frac{\partial T}{\partial t} \quad (2)$$

$$p = p' - p_{avg}, \quad \kappa_p = \frac{k p_{avg}}{\mu_a \phi_a}$$

p : 地下空気圧変動 p_{avg} : 平均地下空気圧

κ_p : 圧力拡散係数 T : 地下空気温度変動

T_{avg} : 平均地下空気温度

ここで地温については、無限媒体において、地表面における温度変動を $T = A_T \sin(w_T t + \varepsilon_T)$ とし、無限遠点の温度変動を 0 とした場合の解である以下とする。

$$T = A_T \exp(-k_T x) \sin(w_T t - k_T x + \varepsilon_T) \quad (3)$$

$$T = T' - T_{avg} \quad k_T = \sqrt{w_T / 2\kappa_T}$$

T' : 地下空気温度 κ_T : 土壌の温度拡散係数

地下空気圧変動は、「大気圧変動は有り、地温変動が無い場合の解」、および「地温変動は有り、大気圧変動が無い場合の解」に分離でき、前者は既存の解がある。本研究では、後者として、地表面の地下空気圧変動が無く、基底面が不透気（地下水面）である境界条件（図1）の解を求める。

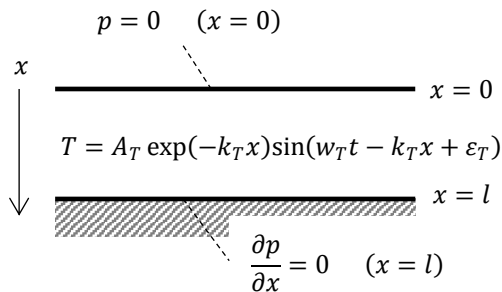


図1 解析解における境界条件

4. 結果と考察

式(2)の解である地下空気圧変動を求め、その勾配から地表面における地下空気の間隙流

速（下向きに正） V_{Tsf} の厳密解を求めた（解はスペースの都合で割愛）。厳密解は、一般的な土壌の物性値、および土壌厚さが40cm以上である事を条件にした場合、以下に近似できる。

$$V_{Tsf} \cong -\frac{A_T w_T}{T_{avg} k'_T} \sin(w_T t + \varepsilon_T + \pi/4) \quad (4)$$

$$k'_T = \sqrt{w_T / \kappa_T}$$

式は、地表面温度が上昇する場合、膨張した地下空気が地表面から流出する現象を表わすと解釈できる。また、地下空気間隙流速は、土壌層の厚さに影響を受けない。

一方、地温変動がなく大気圧変動がある場合の地表面における地下空気の間隙流速 V_{Bsf} は、Auer et al. (1996)によれば以下の式で近似される。この地下空気間隙流速は、土壌層厚さに比例する事になる。

$$V_{Bsf} \cong \frac{A_p}{p_{avg}} l w_p \sin(w_p t + \varepsilon_p + \pi/2) \quad (5)$$

ここで、大気が安定した状態における日常的な大気圧変動（周期：0.5日、振幅：0.6hPa）に対し、地温変動（周期：1日、振幅：10°C）が発生した場合を想定し、(4)式、および(5)式の振幅が同じになる土壌層厚 l_{BT} を求めた。なお、 κ_T は 5.0×10^{-7} (m²/sec)とした。

$$l_{BT} = \frac{w_T p_{avg} A_T}{w_p A_p T_{avg} k'_T} = 2.43(m) \quad (6)$$

このことから、大気圧変動による地下空気流動が小さい条件（大気が安定し土壌層が薄い）においてのみ、地温変動による地下空気流動が同程度になる可能性があると言える。

参考文献

ダニエル・ヒレル, 2001, 環境土壌物理学II, 農林統計協会, 300p.

Auer, L.H., Rosenberg, N.D., Birdsell, K.H. and Whitney, E.M., 1996, The effects of barometric pumping on contaminant transport, Journal of Contaminant Hydrology, 24, 145-166.