



Title	図解法による土の凍結深さ推定
Author(s)	福田, 正己; FUKUDA, Masami
Citation	低温科学. 物理篇. 資料集, 40, 79-85
Issue Date	1982-03-05
Doc URL	<a href="https://hdl.handle.net/2115/18722">https://hdl.handle.net/2115/18722</a>
Type	departmental bulletin paper
File Information	40_p79-85.pdf



## 図解法による土の凍結深さ推定\*

福田正己

(低温科学研究所)

(昭和56年12月 受理)

土の凍結深さを推定する方法としては、いわゆる Neumann 解, Stefan 解として知られる厳密解がある。Berggren<sup>1)</sup>はこれを土の性質を考慮した修正解を示した。この報告では、Berggren の修正解を図解法で解くための、関係図とその使い方について述べる。土の熱的性質と水分条件が与えられ、図を用いて容易に凍結深さを求めることが出来る。

Berggren の修正式によると、凍結深さ (X cm) は次の式で与えられる<sup>2)</sup>。

$$X = \lambda \sqrt{2k_f I_s / L}$$

$K_f$  : 凍土の熱伝導率 cal/cm°C

$I_s$  : 積算寒度 °C · day

$L$  : 凍結潜熱 g/cal

$\lambda$  : パラメーター

ところでパラメーター $\lambda$ は、次の超越関数からなる式で決まる。

$$\frac{e^{-\lambda^2 \mu}}{\operatorname{erf}(\lambda \sqrt{\mu})} - \frac{P \alpha e^{-q \lambda^2 \mu}}{\operatorname{erfc}(r \lambda \sqrt{\mu})} = \frac{\lambda}{2} \sqrt{\pi / \mu}$$

ここで各パラメーターは次のように規定されている。

$$P = (K_u / K_f) \sqrt{\kappa_u / \kappa_f}$$

$$q = K_f / K_u$$

$$r = \sqrt{\kappa_f / \kappa_u}$$

$$\alpha = (T_u - T_s) / (T_f - T_s)$$

$$\mu = (C_f / L) / (T_f - T_s)$$

$K_u, K_f$  : 未凍土, 凍土の熱伝導率

$\kappa_u, \kappa_f$  : 未凍土, 凍土の温度拡散率

$C_f$  : 凍土の比熱

$T_u$  : 年平均気温

$T_s$  : 平均凍結期温度

$T_f$  : 土の凍結温度

$\text{erf}(x), \text{erfc}(x)$  : 誤差・余誤差関数

ここで  $P, q, r$  は土の熱的性質に依存している。また熱的性質は土質、含水条件によって異なる。粘土～砂までの土質の差は一応小さいとすると、含水条件によると考えてよい。そこで土の熱伝導率を、構成する3相（土粒子・水・空気）の体積比で近似する。

$$k = (k_s)^{\theta_s} \cdot (k_e)^{\theta_e} \cdot (k_a)^{\theta_a} \dots \dots (3)$$

$k_s, k_e, k_a$  は土・水・空気の熱伝業率で  $\theta_s, \theta_e, \theta_a$  は各々の体積率である。土粒子は凍土、未凍土で熱伝導率の差がないことと、空気分は小さいので無視すれば、凍土、未凍土の熱伝導率の比は不凍水の存在を無視すると、

$$k_u/k_f = (k_w/k_i)^{\theta_i} \dots \dots (4)$$

凍土・未凍土の容積比熱は次式によって与えられる。

$$C_f = C_{sf} (1 - \theta_i) + C_i \theta_i \dots \dots (5)$$

$$C_u = C_{su} (1 - \theta_i) + C_w \theta_i \dots \dots (6)$$

$C_{sf}, C_{su}$  は土粒子の比熱で  $C_i, C_w$  は氷、水の比熱である。 $C_{sf} = C_{su}$  とすると、 $C_u/C_f$  は、

$$\begin{aligned} C_u/C_f &= 1 + \{(C_w/C_i) - 1\} \theta_i \\ &= 1 + 1.023 \theta_i \dots \dots (7) \end{aligned}$$

(4)式、(7)式を  $P, q, r$  に代入すれば、パラメーターは含水率のみに依存する関係式で示される。

$$q = R^{\theta_i} (1 + 1.023 \theta_e)$$

$$r = \sqrt{q}$$

$$P = r/R^{\theta_i}$$

$$R = k_i/k_w = 3.89$$

( $k_i, k_w$  は氷、水の熱伝導率)

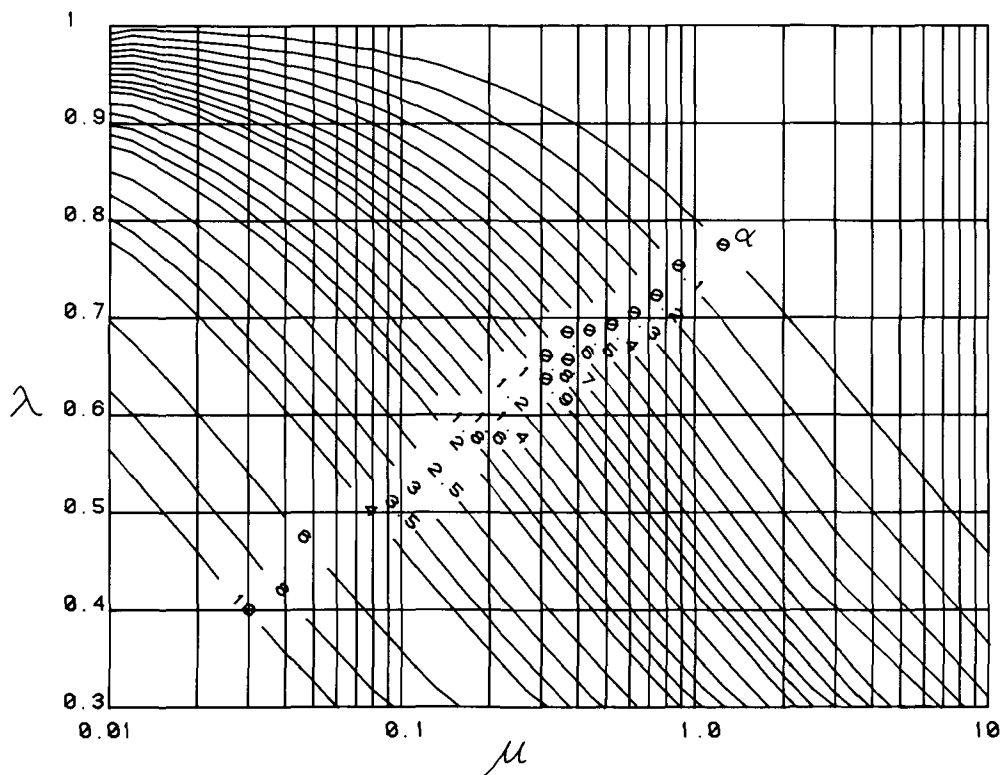
再び(2)式をみると、凍結深さを決める(1)式のパラメーター  $\lambda$  は、 $\mu, \alpha$ 、そして  $\theta_i$  の3つのパラメーターによって決められることになる。この(2)式を解くことで4つのパラメーターの関係を成り立たせる図を作成すれば、 $\lambda$  を決めることができる。誤差関数を Hasting の有理関数近似式で近似し、 $\theta_i, \alpha, \mu$  を変えて  $\lambda$  の値を得て結果を第1図～第5図に示す。各々含水率は 0, 0.2, 0.4, 0.6, 0.8 ( $\text{cm}^3/\text{cm}^3$ ) についての関係である。

この図は次のように用いて $\lambda$ を決める。まず温度条件で $\alpha$ を決める。次に含水条件から、(5)式によって $C_r$ を決める。この $\alpha$ 、 $\mu$ を用いて $\lambda$ を得る。すると(1)式でさらに $X$ が得られる。

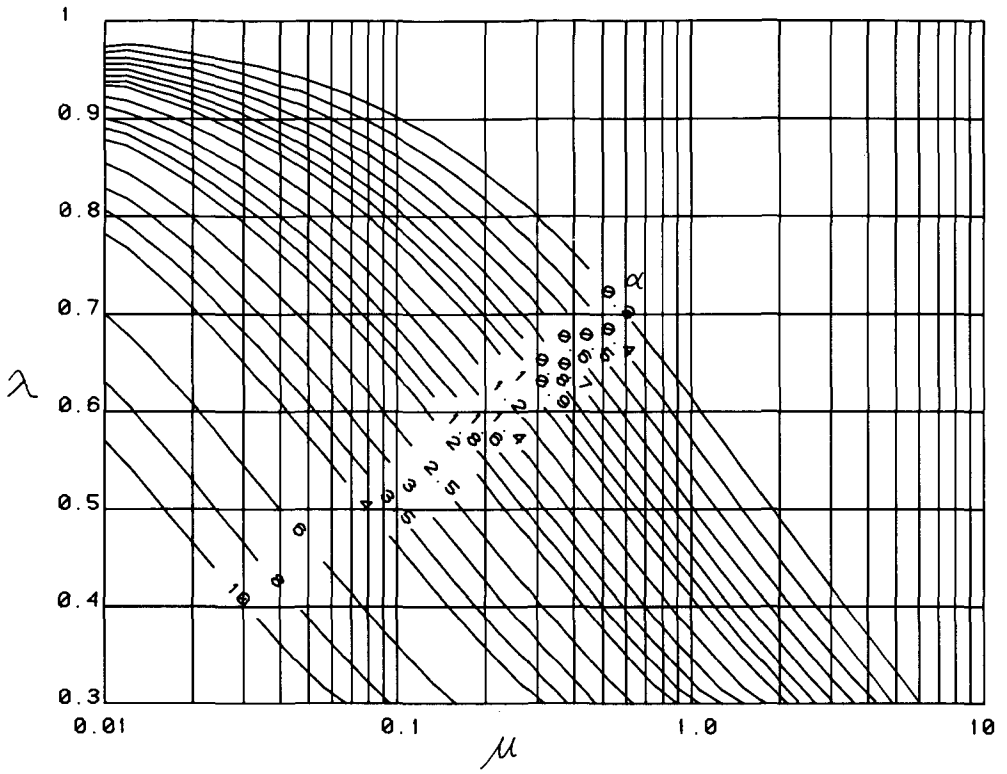
数値解法に比べて精度は良くないが、図解法のみで容易に凍結深さを推定することができる。

文 献

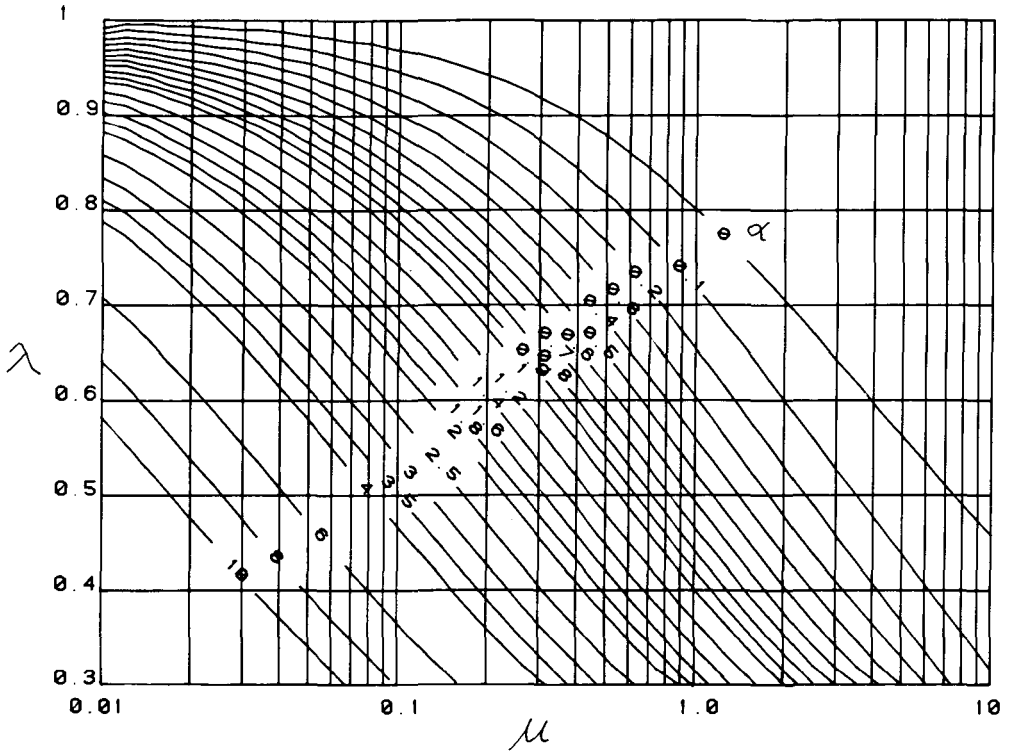
- 1) Berggren, W. P. 1943 Prediction of tempereature-distribution in frozn soils, Transaction, American Geophysical Union, III, 71~77.
- 2) Aldrich, H. P. 1956 Frost penetration below highway and airfield pavements, Highway Research Board, 135, 124-149.



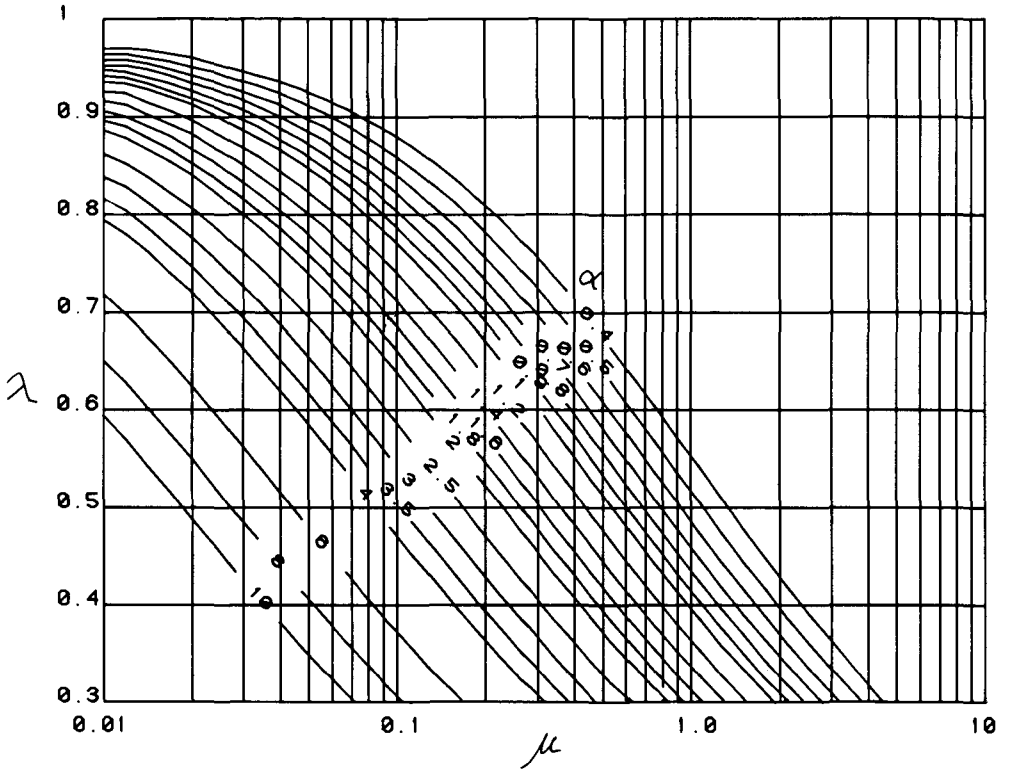
第1図 含水率0 (cm<sup>3</sup>/cm<sup>3</sup>) の場合



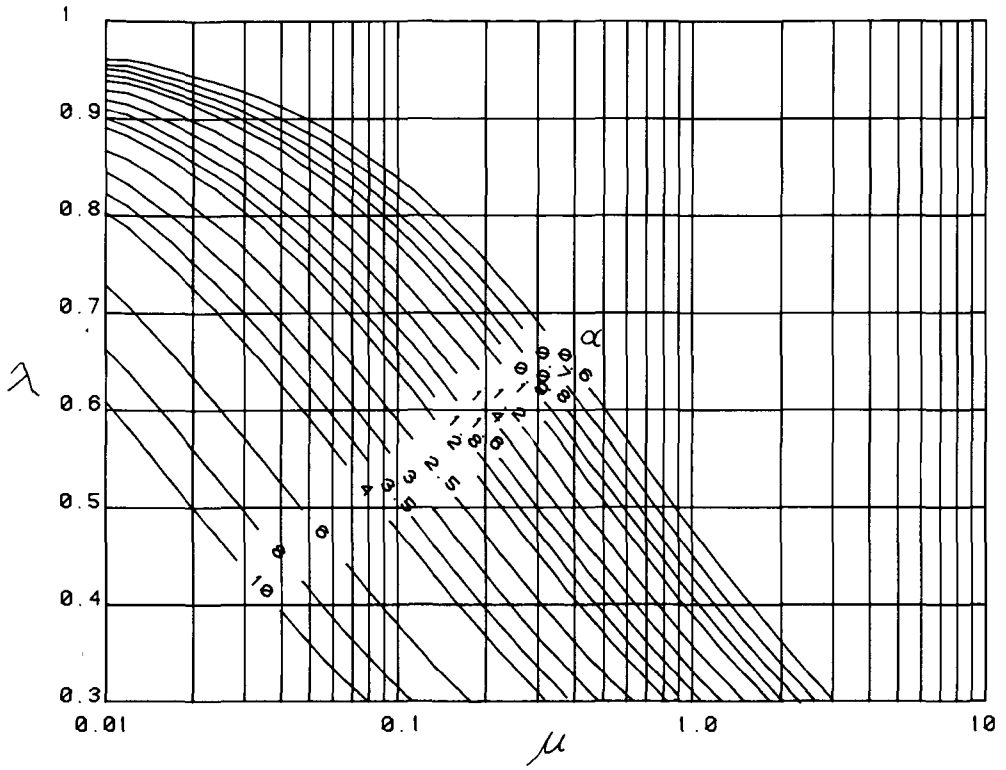
第2図 含水率0.2 (cm<sup>3</sup>/cm<sup>3</sup>) の場合



第3図 含水率0.4 (cm<sup>3</sup>/cm<sup>3</sup>) の場合



第4図 含水率0.6 (cm<sup>3</sup>/cm<sup>3</sup>) の場合



第5図 含水率 0.8 (cm<sup>3</sup>/cm<sup>3</sup>) の場合