

## 埋設ケーブルアプリケーションに関する熱ドライアウト曲線の生成

### Producing Thermal Dryout Curves for Buried Cable Applications

水分含量と土壌熱伝導率または抵抗率間の関係は、熱ドライアウト曲線と呼ばれている（抵抗率は伝導率の逆数）。土壌の伝導率は水分含量に強く依存するが、温度、バルク密度および組成にも依存する。水分含量、密度、温度および組成に触れることなく、土壌の熱伝導率の話をするは無意味である。組成と密度が固定されている場合、温度は一般に熱伝導率への影響が小さな範囲で変化する（土が凍結しない限り）。従って主要な変数は水分量となる。熱ドライアウト曲線の目的はこの変動の熱伝導率への影響を表すことにある。このアプリケーションノートでは、熱ドライアウト曲線を得るために用いられてきた方法をいくつか示し、それらのうちの2つを結合し、信頼できる結果をもたらす簡単な方法を紹介する。

#### 選択肢

熱ドライアウト曲線を得るために3つの方法が使用されている。1つ目の方法は、土壌の熱特性に関して公表されている関係性を使用し曲線をモデル化するものである。2つ目は、土壌サンプルが飽和状態から乾燥していく過程の熱伝導率と質量をモニタリングするもので、3つ目は、ある範囲にわたり水と土壌サンプルを混在させ、これらのサンプルの伝導率と水分含量を測定するものである。

**1. モデリング :** Campbell (1985) 及び Campbell et al (1994 年) は水分含量、温度、密度、組成の関数として熱伝導性を記述するテストモデルを公開してきた。この方法により、ドライアウト曲線はテストサンプルの組成、密度、所望温度でドライアウト曲線をプロットするモデルを利用し生成される。この方法は、非常にシンプルかつ明快でほとんど情報を必要としない。ただしユーザーのほとんどから、この計算の妥当性を確認できるような熱伝導率の実測値が求められている。しかし、こ

のモデルは土壌や他の熱的材料のための圧縮、組成、温度変化の影響を調査するための利便性は高い。

**2. 単一のサンプル :** この方法の場合、約 10cm の直径と 10cm 深さの土壌サンプルが、原状土の芯を繰り抜いたものか、埋戻し材にとって望ましい密度に固めたものかのいずれかが用意される。サンプルを準備した方法はドライアウト曲線を用いた用法によって決定されている。このサンプルは 9cm の深さの水の入ったパンに入れられ、一晩放置することで飽和させられる。デカゴン社 TR-1 熱特性プローブまたは同等のものがサンプル内に設置され、熱特性測定が行われる。サンプルはこのとき秤量される。サンプルが乾燥するまで、幾度も追加的な伝導性測定及び秤量がなされる。サンプルは最終的に完全に乾燥させるために 105℃ のオーブンに入れられ、室温に冷却した後乾燥サンプルの最後の伝導性測定及び秤量が行われる。乾燥質量と容器質量が分かれば、他のすべての測定時間の水分含量を計算することができる。ドライアウト曲線は、これらのデータからプロットされる。

この方法はかく乱することなくすべての測定を行えるという利点があり、乾燥のためにサンプルが収縮しないかぎり密度は一定に保たれる。しかし、2つの大きな欠点がある。一つは、ドライアウト曲線を得るためには長い時間を要することである。加熱されない限り土壌はすぐには乾燥しないし、もし加熱された場合は、高温に伝導性測定に大きく影響する。また、熱伝導性はサンプルのおおよそ真ん中で測定され、平均的水分含量は質力測定から割り出す。土壌や他の多孔質物質は均一には乾燥しないため、水分含量の平均は熱伝導性測定の位置の水分含量に等しくはならない。エンジニアは通常は、伝導性がどの程度高くどの程度低いかのみを知りたい（たいの場合どの程度低いかのみ知りたい）ので、これら

の誤差はしばしば重要ではないが、それでも特に曲線の変曲点を示すところで、誤差が生じることになる。

**3. 複数のサンプル:** この手法の典型的なアプローチは乾燥した土壌で開始し、サンプルホルダに所望のバルク密度を詰め、TR-1 ニードルセンサーまたは同等のもので伝導性を測定し、質量を測り、かつ水分含量測定のためのサンプルをとる。サンプルは追加の乾燥土が入ったより大きな容器に戻され、水が足され、混合され、このプロセスが繰り返される。5~10 ポイントが迅速かつ容易に得られる。サンプルホルダのサンプルの大きさは重要ではないが、10cm の直径と 10 cm の深さのサンプルホルダが便利である。

この方法は迅速で容易という利点がある。また、明らかに原状土に利用はできない。この方法の大きな欠点は、乾燥サンプルで高いバルク密度（最適な密度）を得ることが非常に困難という点にある。サンプルは油圧プレスを使用し高密度に圧縮することはできるが、乾燥した土壌は従来のドロップハンマーを使用しても圧縮できない。密度は多くの場合に熱的埋込み材の最重要因子なので、これは大きな欠点である。

### 組み合わせ法

我々は方法 1 と方法 2 の組み合わせを推奨する。土壌コアを方法 2 のように準備し、飽和させ、重量と熱伝導率を測定する。その後、コアをオープン乾燥させ、室温に戻し再び伝導性と重量を測る。質量測定から密度と水分含量を計算する。この一連の測定により、ドライダウン曲線の 2 点が固定される。これらの間の補正は Campbell(1985)による方程式を使用して行われる。

$$k (W m^{-1} K^{-1}) = A + B\theta + (D - A)(1 - g) \quad (1)$$

ここで  $\theta$  は水分含量である。方程式に含まれる定数は測定値から決定される。 $D$  は乾燥サンプルの熱伝導率。 $B$  は式(2)から計算される。

$$B = 2.8\phi = 2.8\rho_b / \rho_s \quad (2)$$

ここで  $\phi(m^3m^{-3})$  は土壌の全空隙率。 $\rho_b$  はサンプルの測定されたバルク密度( $Mg/m^3$ )、 $\rho_s$  は粒子密度で一般的に  $2.65 Mg/m^3$  と仮定される。 $g$  項は後述するが方程式(1)及び飽和状態の測定から土壌が湿った状態にある場合 1 の値を持つ。

$$A = k_{wet} - B\theta_{wet} \quad (3)$$

$k_{wet}$  は水分を含む土壌の熱伝導率。これらを式(1)に代入し式(4)が得られる。

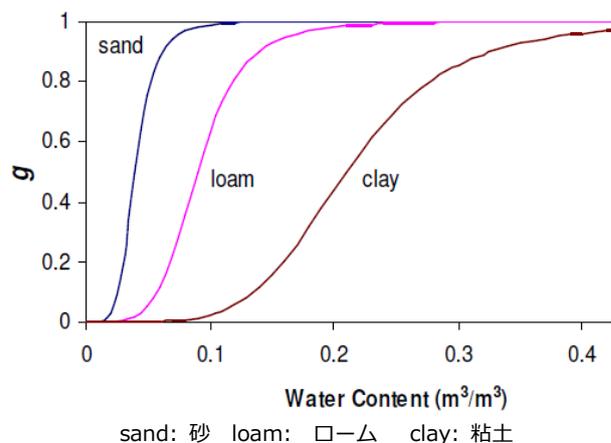
$$k = k_{wet}g + k_{dry}(1 - g) + 2.8\phi(\theta - \theta_{wet}g) \quad (4)$$

この関数で、 $g$  は乾燥土壌の値 0 から湿潤土壌の値 1 まで変化する。 $g = 0$  and  $\theta = 0$  を式(4)に代入したとき  $k = k_{dry}$  を得る。 $g = 1$  and  $\theta = \theta_{wet}$  を代入すると  $k = k_{wet}$  を得る。

この関数で、 $g$  は次のように計算される:

$$g = \frac{1}{1 + \left(\frac{\theta}{\theta_o}\right)^{-5}} \quad (5)$$

ここで  $\theta_o$  は土壌内の水分フローのカットオフ水分含量（詳細は Campbell et al(1994)）。この関数は砂、ローム、粘土で以下の値を示す。



カットオフ水分含量は式(6)を用いてサンプルの粘土割合から近似される。

$$\theta_o = 0.3073m_c + 0.0334 \quad (6)$$

粘土含量が知られていないとき次の表の土壌組織から推定できる。粘土含量はもちろんテクスチャークラス（土壌組織）内で変化する。式 6 で与えたカットオフ水分含量もまた表に示す。

土壌組織	粘土 (g/g)	$\theta_o$ ( $m^3/m^3$ )	Wad (g/g)
砂	0.03	0.043	0.003
ロ-性砂	0.07	0.055	0.005
砂質ロ-ム	0.10	0.064	0.015
砂質粘土ロ-ム	0.27	0.116	0.048
ロ-ム	0.18	0.089	0.035
砂質粘土	0.40	0.156	0.068
シルロ-ム	0.15	0.079	0.033
シルト	0.07	0.055	0.025
粘土質ロ-ム	0.34	0.138	0.058
シル質粘土ロ-ム	0.33	0.135	0.055
シル質粘土	0.45	0.172	0.068
粘土	0.60	0.218	0.078

## Notes

- 抵抗プロットをとることは式(4)で与えられているように伝導性の逆数をとることである。
- $k_{dry}$  値はオープンによる乾燥土壌のものである。この水分含量はこれまで自然界に見られたものよりも低い。したがってその値は当然には乾燥土壌の伝導性に見做すべきではない。上記の表は土壌の空気乾燥した水分含量の近似値を与える。土は常にほとんどの場合に空気乾燥より高い水分含量を有する。例外としては、溝が掘られ、その埋め戻しが長期間土壌表面上で乾燥させられた後に行われた場合であろう。密度や伝導性を高めるためには埋設ケーブルの廻りを湿らせてお

くほうが賢明であろう。少量の水分がドライエンドで伝導性を増加させる大きな効果を生む。

- 高い水分含量のマッチング点は飽和状態である必要はない。しばしば最大密度のサンプルの熱伝導率を知りたいものもいるだろう。標準的な方法を用いて最大密度の適切な水分含量が決定されたならば、最適水量でサンプルは固められ、その熱伝導率が決定されるだろう。これが湿性マッチング点になる。
- 乾燥とともに膨潤粘土土壌は縮み割れる。このような土はここに示した方法で特別な問題が生じる。湿潤あるいは飽和状態での測定はここで示したように行われるが、乾燥測定は異なる手法でなされることを要する。すべての状況で機能する方法を提供することは困難だが、これらの土の乾燥時の伝導性は、注意深くプローブのための穴を空けて、適切な熱のグリースを伴ったプローブを挿入し、土くれかペッドをとることで測定することもできる。
- 乾燥土壌に関する最も良い結果は 10 分の読取時間で TR-1 ニードルを使用して得られるであろう。
- これらの手続きを用いたドライアウト曲線は測定がなされる温度におけるものである。飽和あるいは乾燥土壌の伝導性に温度は効果がほとんどないが、中間的水分含量の伝導性に大きく影響する。室温以外の熱伝導性の場合、詳細モデルあるいは測定のフルセットが必要とされる。ここで与えた補正法は上手く機能しないであろう。

## 参考文献

Bristow, K. 2002. Thermal Conductivity, p1209-1226. *Methods of soil analysis. Part 4. Physical Methods* (Soil Science Society of America Book Series, Vol. 5). Soil Science Society of America. Madison, WI.

Campbell, G. S. and J. M. Norman. 1998. An Introduction to Environmental Biophysics, 2<sup>nd</sup> Ed. Springer Verlag, New York

Campbell, G. S. 1985. Soil Physics with BASIC: Transport Models for Soil-Plant Systems. Elsevier, New York.

Campbell, G. S., J. D. Jungbauer, Jr., W. R. Bidlake, and R. D. Hungerford. 1994. Predicting the effect of temperature on soil thermal conductivity. *Soil Sci.* 158:307-313.13994-01