

KD2Pro の ASTM 及び IEEE 標準遵守

KD2 Pro Compliance to ASTM and IEEE Standards

KD2Pro は ASTM D5334-08 に準拠する。規則遵守証明書は thermalresistivity.com からダウンロードするか、デカゴン (Decagon) 社に直接要求することが可能である。

ASTM 標準 2008 年版

ASTM D5334-08 は、熱ニードルプローブ法による土壌及び岩盤の熱伝導率決定における標準試験法の最新版である。これは熱および物質移動に関する現在の研究に準拠した、最もよい実用例である。正確な測定のためには、この ASTM Standard の最新版を指定し使用することが重要である。

ASTM D5334-08 準拠 KD2Pro の特長

- KD2Pro のシングルニードルセンサー (TR-1 と KS-1) は、無限に長く無限に薄い熱源の条件をシミュレーションするための直径比率に対する十分な長さを有する。
- KD2Pro は線形熱源と温度測定素子で構成され、温度は 0.001°C の分解能で測定される。
- KD2Pro は定常電流を発生させる。
- KD2Pro は電圧と電流を 0.01V および 0.01A に近い精度で読む。
- KD2Pro は時間を 0.1 秒に近い精度で測定する。
- 付属品はそのニードルに等しい直径と深さのパイロットホール穿孔能力を有する。
- 時間の経過に伴う熱減衰率が温度ドリフトの効果を最小化するように考慮されている。

マイクロプロセッサベースの分析的な方法は、ASTM D5334-08 のすべての仕様書に従う。KD2 Pro は、正確な測定を保証するために補正され、精度保証標準物質が付いている。

IEEE 442-03

IEEE は IEEE442-03 (1981 年に最後の全体的な見直しと改訂が行われている) の更新を検討している。

KD2Pro は IEEE442-03 が基づくすべての理論的な仮定に従い (参照、付録 A、理論及び分析)、IEEE が初めて考案された時に使用された手造りのプローブや紙と鉛筆による分析ではなく、技術的により優れたセンサー及びマイクロプロセッサが活用されている。

IEEE は IEEE442-03 標準の導入の中で、こう述べている。「すべての IEEE 標準は、改訂または再確認のために、少なくとも 5 年に 1 回は再評価の対象とする。ドキュメントが 5 年以上のもので、再評価されていないものは、価値がないとは言えないが、その内容は完全には現状の技術水準を反映したものではないとするのが妥当である」と。IEEE442-03 の前回の再評価は 2003 年であった。

IEEE がこの標準を変更していくため、熱量及び物質移動の現状の技術水準を最新の改訂により伝える ASTM 5334-08 を指定して、それに従うことは賢明であるかもしれない。IEEE442-03 で概説されるフィールドプローブの寸法とプローブ加熱時間から明示的に発生する不正確性は Appendix A で示す。

アメリカ土壤学会 (SSSA)、分析法 Part 4 物理的手法 5.3 (熱伝導率 pp 1209-1226)

KD2 Pro のプローブニードルの大きさ、加熱時間、精度仕様書、及び内部データ分析は、SSSA の手法で概説された推奨値に従っている。遵守証明書はデカゴン社に請求し入手することができる。

付録 A: 理論と分析

非定常線熱源理論

ASTMやIEEE熱伝導率/抵抗率の測定標(IEEE442とアメリカ材料試験協会5334)で使用されている方法は熱線法(transient line heat source) または非定常熱ニードル法(transient heated needle method)と一般的に呼ばれている。一定の割合の熱 q が無限に長く無限に小さい線源に適用されたとき、繰り返し発生する熱源の温度反応は、次の方程式(1)によって記述される:

$$\Delta T = -\frac{q}{4\pi k} Ei\left(\frac{-r^2}{4Dt}\right) \quad (1)$$

ここで k は線源が埋め込まれた媒体の熱伝導率、 D はその媒体の熱拡散率、 r は線源からの温度が計測された場所までの距離、 Ei は指数積分である。 Ei は次の方程式で定義され提示された級数で近似されている。

$$\begin{aligned} -Ei(-\alpha) &= \int_{\alpha}^{\infty} (1/u) \exp(-u) du \\ &= -\gamma - \ln \alpha + \alpha - \alpha^2/4 + \dots \end{aligned} \quad (2)$$

ここで、 $\gamma=0.5772\dots$ はオイラー定数で、 $a=\gamma^2/4Dt$ である。

Ei の無限級数の中で $\ln a$ 以下の項は、 r が小さく D が大きいとき、無視できる程度に小さい。よって式(2)は次のように近似される。

$$\Delta T \approx \frac{q}{4\pi k} \ln t + C \quad (3)$$

ここで C は定数。よって、 ΔT vs. $\ln t$ のグラフは $q/4\pi k$ の傾きを持つ直線になる。直線は2点で定義されるので、 k は次の式から算出される。

$$k = \frac{q(\ln t_2 - \ln t_1)}{4\pi(\Delta T_2 - \Delta T_1)} \quad (4)$$

抵抗率 ρ は k の逆数である。IEEE 442-03 は k を得るためにこの簡素化された手法を用いている。

方程式(4)の仮定

この簡素化された方程式は以下3つの仮定にかかっている。

1. 指数積分は対数によって近似される。
2. プローブは無限に長く無限に小さい。
3. 周囲温度は測定中一定。

実際、プローブは無限に長くなく無限に小さくはない。サンプルの周囲温度もまた測定中一定ではない。すなわち、常にある程度の温度ドリフトが存在する。

よりよい解決策

有限の長さを持つプローブにとっては、微分方程式が適切な解決策を与える。半径 a (m) 及び高さ $2b$

(m) 円筒形の熱源において、温度がその中心で測定される場合、加熱中の温度上昇は式(5)で与えられる。

$$\Delta T = \frac{q}{4\pi k} \int_{r^2/4Dt}^{\infty} \frac{u^{-1} \exp(-u) \exp[-(a/r)^2 u]}{I_0(2au/r) \operatorname{erf}\left(\frac{b}{r} \sqrt{u}\right)} du \quad (5)$$

ここで $I_0(x)$ 0次の修正ベッセル関数を表し、 $\operatorname{erf}()$ は誤差関数、 u は積分変数である。 a/r が0に近づくに従い、

$$\exp[-(a/r)^2 u] I_0(2au/r)$$

は1に近づく。 b/r が無限に発散するに従い、

$$\operatorname{erf}\left(\frac{b}{r} \sqrt{u}\right)$$

は1に近づく。これらの極限で式(5)は式(1)となる。

簡素化された近似：この方程式はどの程度機能するのか?

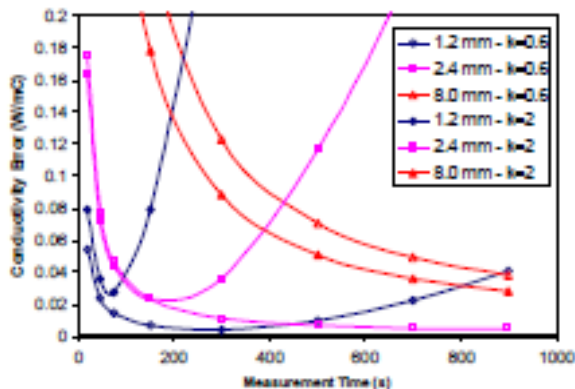
方程式(5)は有限の長さを持つプローブが使用される場合、 k または ρ の値を得るために方程式(1)または方

式(4)を用いて生じ得る誤差を評価するために使用される。KD2 及び KS-1 と TR-1 のどちらのサーマルニードルの構成によっても、熱源半径 a と測定半径 r は同じとする仮定に矛盾しない。IEEE 442-03 により提示されたプローブの長さ l と直径、およびデカゴンの小さなシングルニードルプローブを表 1 に示す。ASTM 5334-08 はニードルサイズを指定していない。

	IEEE Field	IEEE Lab/TR-1	KS-1
長さ(mm)	2000	100	60
直径(mm)	8	2.4	1.27

表 1： IEEE442-03 により提示されたニードルの寸法と、デカゴン KS-1 と TR-1 のニードルの寸法。KS-1 は無限量の線熱源の仮定と適合し、補正なしで正確な計測を示す。

シミュレーションされた温度上昇データは方程式(5)を、 k の計算には方程式(4)を用いた。方程式(4)から予測された熱伝導率と真の熱伝導率(温度データ生成に使用された)の違いは、3種類のプローブ直径ごと図 1 で示す。対数プロットの傾きは時間とともに変わって来るので、誤差もまた時間とともに変わる。時間的尺度は方程式(4)の傾きが計算された中心時間を示す。3種類のプローブの大きさと2つの熱伝導率による値を示す。



Conductivity Error (W/mC) : 熱伝導率誤差
Measurement Time (s) : 測定時間

図 1。表 1 のプローブについて傾きを計算した時間において方程式(4)で算出された k 値の誤差。*NOTE: この情報は補正されていないプローブのもの。シミュレーション特性は湿気ある土および飽和ケイ砂による。

図 1 からの結論

3つのことが数値から明らかに見てとれる。

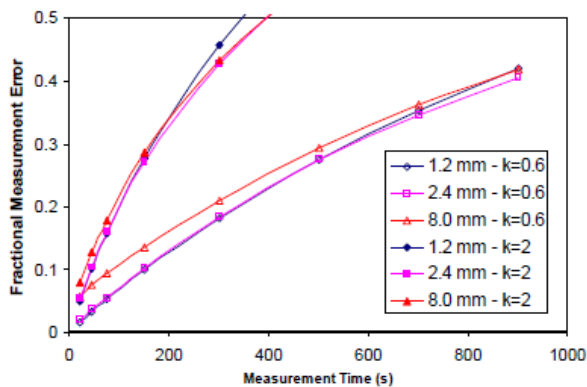
第一に、プローブの大きさは誤差に大きく影響する。プローブが大きくなるにつれて、特定の時間における誤差も大きくなる。第二に、誤差は時間とともに減少し、そのため大きなプローブでさえ時間が経つと容認できるほど小さな誤差となる。第三に、観察されることは、誤差は長時間の加熱後に増大し始めるということである。これは有限のプローブ長に起因している。無限に長いプローブについては、誤差は時間とともに減少し続ける。表 1 のプローブの場合はすべて十分に長いので、計測が適切な時に行われているのであれば、有限長から来る誤差は無視できる。絶対的な誤差は媒体の伝導率に無関係で現れ、従って部分的誤差は低い伝導率サンプルでより大きくなる。図 1 の誤差が、プローブが補正されていないときだけ発生することを覚えておくことも重要なことである (k の計算に用いられたローレスポンス)。熱伝導率標準を有するプローブの補正はこのタイプの誤差を取り除く。

測定誤差に関する有限プローブ直径の効果は、常に伝導率の過大評価または熱抵抗率の過少評価によるものである。図 1 で示された誤差のすべては、熱伝導率として知られる標準に対する補正によって容易に取り除かれるが、プローブはしばしば補正なしで使用される。補正なしで IEEE442-03 で指定されたプローブ使うためには、ラボ内のニードルで 2~3 分の、フィールドのニードルで最低 10 分の加熱時間が必要とされるべきである。

加熱時間の限界

フィールドプローブを除いて、30s から 200s の加熱後に容認できる誤差値が現れるように見える。しかし、長い加熱時間は最低 2 つの理由で有害である。湿気のある土で水は、高い温度の領域から低い温度の領域に動く。従って、ニードルの加熱によって水分がニードルのまわりを動く。これは熱伝導率を測定する領域の熱伝導率を減少させる。加熱時間の最小化は、この種の誤差の大きさを小さくする。

長い加熱時間の誤差への2つ目の影響は、測定の結果への試料の温度ドリフトの影響である。IEEE 標準で提案された方法は、測定中の温度ドリフトに極めて影響され易い。図2は、0.001c/sの極めて小さい試料の温度ドリフトの誤差の影響を示す。誤差は、この場合、温度ドリフトとともに測定されたプローブとそれなしのプローブの場合の違いである(ドリフトなしの値で規格化されている)。長い時間ではプローブはほとんど熱くならないため、ドリフトの影響が相対的により大きくなるため、短い加熱時間が誤差を最小化する。また、温度上昇はニードルの温度上昇で、温度上昇は高い伝導率素材で低い伝導率素材に比較し小さく、従ってドリフトの相対的な影響が大きくなるので、素材の伝導率もこの誤差へ影響を与える。この温度ドリフトの誤差は測定中の加熱フェーズの分析の結果である。KD2 Pro は加熱と冷却フェーズを分析し、分析によりこの種の誤差の原因を取り除く。



Fractional Measurement Error : 部分的測定誤差
Measurement Time:測定時間

図2. テスト下の素材の温度ドリフトが0.001c/sであるとき、2つの熱伝導率について、表1のプローブごとにkを計算したときの誤差。

このような背景によって、私達は今やKD2Pro 測定の詳細と標準の分析を比較することができる。より小さいKS-1 ニードルは無限の線熱源理論の仮定と一番よく適合している。より大きいTR-1 ニードルは、IEEE 442-03 ラボニードルのための仕様書に対応している。図1と図2は、方程式(4)が分析のために使われた場合、より小

さいニードルがよい結果を与えることを示している。実のところ、もし補正が既知の伝導率の標準に対してなされたならば、両方のこのより小さいニードルに正確な結果をもたらすであろう。

手作業によるあるいはコンピュータによる分析?

IEEE 標準は1000sまたは600sの加熱時間にわたって、鉛筆と紙でデータを収集するように提示している。データを片対数グラフ用紙にプロットし、直線に見えるデータの集合を目で選択し、その方程式(4)に代入する直線上の2点を選び、方程式(4)の逆数から ρ を計算する。KD2Pro は、30 sの加熱時間と30 sの冷却時間にわたり1 s 間隔にデータを収集する。温度は24ビットのADコンバーターで測定される。指数関数的解決は、測定中の温度ドリフト効果を取り除きながら、加熱と冷却の両方のデータに対して非線形の最小二乗法によってなされる。計算のすべては、内部的16ビットマイクロコントローラによりなされ、結果が表示される。すべての計算が内部的に行われるため、個々の温度を記録する必要はない。2つではなく40個のデータポイントがkの値を決定するために使用される。線形の温度ドリフト効果は取り除かれ、主観に陥りやすい手や目によるデータフィッティングを取り除かれる。測定の正確性は、伝導率が知られているグリセリンや寒天水のような、熱伝導率の標準を用いて確認される。

KD2-Pro の IEEE 442-03 遵守

KD2ProがIEEE442-03に対応するというデカゴン社の主張は、KD2Proプロが、熱線法(transient line heat source)または非定常熱ニードル手法(transient heated needle method)を用いて、無限の線熱源のための微分方程式の近似的解法によって熱抵抗を発見するという事実に基づく。TR-1ニードルはIEEEラボニードルの仕様書に合致する。分析は物理学による改善された理解、およびこの標準が初めて作製されて以来起こってきた技術の改良の結果として、マイクロコントローラ内で行われる。

13945-01 ©2009 Decagon Devices, Inc. All rights reserved