

液体の熱特性を測定するためのKD2Proの使用

Using the KD2 Pro To Measure Thermal Properties Of Fluids

Douglas R. Cobos, Ph.D

概要

KD2 Pro は、熱線法を用いて固体と流体の熱特性を測定するものである。この技術では熱パルスがニードルに装備され、熱パルス発生中及び発生後、加熱ニードルあるいは調整ニードルのいずれかで時間とともに温度反応がモニターされる。温度反応は物質の熱特性の結果である。私たちは、熱特性を計測する際、伝導に関わる熱移動のみを測定したいと願う。粘性の低い流体では、対流による熱移動は伝導による熱移動よりも非常に大きなものであろう。よって、正確な流体の熱特性の測定では、対流熱交換を無視することが要求される。

流体の対流熱交換は、強制対流と自然対流という2つのカテゴリーに分けることができる。流体が機械的な力がかき混ぜられるとき強制対流が起こる。液体の中に温度の高いあるいは低い物体を入れると、自然対流が起こり得る。物体と流体の温度差は液体中に密度勾配をつくり、これによって流体の混和が生じるのである。強制対流及び自然対流による熱交換を最小化するために特定の手法が取られている。

強制対流の抑止

強制対流を取り除くため、流体サンプルとセンサーは測定中に完全に静止してなければならない。サンプルの僅かな振動さえ熱特性測定に関与し得る。実験室で排除すべき振動の原因となるものには、以下のものがある。

- 冷暖房、換気、空調システム (HVAC) からの振動
- 測定装置に近いコンピュータ・ファンからの振動
- 実験室を動き回る人々からの振動
- 他の実験装置からの振動

実験室内で振動の原因を除くことができない場合、強制対流による誤差を取り除くために光学台または他の振動隔離装置で測定することが必要になる。もう一つの

般的方法是、KD2Pro を自動モードに設定し、振動を引き起こす可能性のある HVAC システムや他の実験室の装置の電源を切り、夜間に測定するものである。

自然対流の抑止

自然対流を除くためには複数の過程を考慮することになる。自然対流による熱移動は次の式で記述される。

$$g_H = \frac{0.54 \rho^* D_H \left(\frac{g d^3 \Delta T}{\Gamma \nu D_H} \right)^{1/4}}{d} \quad (1)$$

ここで、 g_H は熱コンダクタンス ($\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$)、 ρ^* は流体のモル密度 (mol/m^3)、 D_H は流体の熱拡散速度 (m^2/s)、 g は重力加速度 (m/s^2)、 d は流体中に置かれた物体の特徴的寸法 (m)、 ΔT はバルク流体とそれに挿入された物体の間の温度差、 T は温度 (K)、 ν は流体の運動粘性 (m^2/s) である。

方程式 1 を見ると、熱コンダクタンスが流体内に設置されたプローブの特徴的寸法 (d) に関連していることがわかる。特徴的寸法は対象の形状とその上を流体が流れる方向の関数である。この議論のために、ニードルのプローブを正確にシリンダーと表現する。シリンダーの軸が流体の流れと平行な場合、特徴的寸法は長さとなる。シリンダーの軸が流体の流れと垂直な場合、特徴的寸法は直径となる。加熱されたプローブがより冷たい流体に設置されたとき、プローブ近くのより暖かい低密度の流体はまわりの高密度の物体に作用する重力により上向きの力を受けるため、自然対流によるプローブまわりの流体の流れは上向きであろう。そして、加熱されたニードルが液体に水平に挿入されると、ニードルのまわりの流体の流れはニードルの軸に垂直になり、特徴的寸法はその

ときニードルの直径となる (KS-1 の場合 1.27mm、TR-1 の場合 1.8mm)。ニードルが垂直に流体に挿入されると、流体の流れはニードルの軸と平行になり、特徴的寸法はニードルの長さとなる (KS-1 の場合 60mm、TR-1 の場合 100mm)。自然対流による熱コンダクタンスが特徴的寸法に反比例していることを確かめ、ニードルを垂直に流体に挿入すれば、対流伝熱を減らすことができ、熱伝導率のより正確な測定につながる。

もう一度、方程式 1 を見てみよう。自然対流による熱コンダクタンスは、流体と挿入される物体の間の温度差に比例することがわかる。それ故に、自然対流はニードルの加熱を制限することで減少させることができる。KD2 Pro KS-1 (60mm シングルニードル) のセンサーは、「流体で使用するために特別に設計され、自然対流を引き起こすことなく流体の熱伝導率を測定することができる」という非常に小さな熱パルスを提供している。KD2 Pro TR-1 (100mm シングルニードル) と SH-1 (デュアルニードル) センサーは、大きな熱パルスを作り出すため、低粘性流体 (表 1) では決して使われない。低粘性流体 (例えば水または水溶液) で KS-1 センサーを使う際、流体とニードル間の温度差をより最小にするために、測定時間は最小の 1 分間に設定されなければならない。

表 1. 様々な液体における KD2Pro プローブの適性

プローブタイプ	粘性流体 (グリセリン、ヒマシ油)	低粘性流体 (水、水溶液)	増粘安定水
KS-1	Best	Best ¹	Best
TR-1	OK	NO	OK
SH-1	NO	NO	OK

¹ 低粘性流体では、KS-1 による測定時間は最小の 1 分、ニードルは垂直方向とする。

方程式 1 からさらに熱コンダクタンスは流体の運動粘性に反比例することがわかる。よって、より粘りある (より厚い) 流体の熱伝導率の測定は自然対流の影響は受けない。ヒマシ油 ($u = 1.0 \times 10^{-3} \text{m}^2/\text{s}@20^\circ\text{C}$) やグリ

セリン ($u = 7.4 \times 10^{-4} \text{m}^2/\text{s}@20^\circ\text{C}$) のようなより粘りある流体は、熱伝導率測定間に自然対流による影響を受けることはなく、さらなる予防的注意なしで KS-1 センサーで容易に測定される。しかし、水のような低粘性流体 ($u = 8.9 \times 10^{-7} \text{m}^2/\text{s}@20^\circ\text{C}$) では自然対流を防ぐのは難しい。慎重に実験的テクニックを用いることによって、水と水溶液の熱伝導率は KS-1 センサーで測定することができるが、水より低い粘度による流体について正確な測定はできない。流体の粘度は、流体の温度に反比例している。慎重に実験的テクニックを用いることによって、研究者らは KS-1 センサーで水溶液の熱伝導率を約 50°C まで測定することができる。

低粘性流体は、増粘剤で粘性を増やし対流を防いで安定させることができる。実際、寒天 (Ochsner et. al.2003、Campbell et. al.1991) で増粘安定させた水の中で熱特性プローブを補正することは、科学文献では一般的である。KD2 Pro SH-1 と TR-1 センサーでさえ、増粘安定させられた水の熱特性は正確に測ることができる。純粋な寒天粉は様々なものから得ることができる。寒天粉の扱う 2 つの供給元を以下に示す。

VWRサイエンティフィック社	アルファエイサー社
Agar powder USP, 100g (寒天粉、米国薬局方)	Agar powder (寒天粉)
CAS番号: 9002-18-0	CAS番号: 9002-18-0
品目:# IC10026280	品目:# A10752
\$20 /100g	\$15 /100g

寒天粉は固定安定化させるために煮沸した水溶液とされ、すべての粉が解けるまでかき回される。一般に溶液 1L 当り寒天粉 5g の混合比率は、安定した溶解に適切なものである。しかし、必要な濃度は、溶解の化学的性質にいくぶん依存している。寒天と水の混合物は、室温に戻された後、Jell-O™ のコンシステンシーに一致しなければならない。混合物が十分に固定安定化しない場合は、さらに寒天粉を加えて、溶解するまでもう一度煮て掻き回すことになる。

液体サンプルの温度制御

しばしば、熱特性測定の間、液体サンプルの温度の制御が望まれる。サンプルの加熱及び冷却行為が、上記のような強制あるいは自然対流を引き起こさないように努めることが重要である。加熱あるいは冷却したサンプルの熱特性を測る際は、避けられなければならない注意事項がある。それらを以下に示す。

- サンプルを底（例えばホットプレート上で）から熱しない。加熱による温度勾配は自然対流を引き起こす。
- 通常の冷蔵庫またはフリーザーで測定しない。通常の冷却装置は、過度の温度ドリフトと精度の低い測定をもたらす非常に大きな周期的な温度サイクルを有する。コンプレッサーからの振動もまた強制対流につながる。
- 恒温液槽が循環状態にある間、サンプルの熱特性を測らない。恒温液槽ポンプと循環する水からの振動は強制対流を引き起こす。

液体サンプルで KD2Pro を使う数人の研究者によると、液体試料の温度をコントロールするための最良の方法は以下である。

1. 恒温液槽でサンプル（センサーを挿入した）を加熱冷却する。
2. サンプル温度が望ましい液槽温度で平衡に達したら、恒温液槽の電源をオフにする。
3. 恒温液槽が完全に静止する十分な時間を待って、それから測定を行う。

まとめ

- KS-1（シングルニードル小）センサーでは流体の熱特性のみを測定する。

- 測定の間及び直前に流体の振れ、混合、振動がないことを確認する。
- プローブの流体への垂直挿入は自然対流による誤差を最小化する。
- KD2 Pro の測定時間を最小の 1 分と設定する。
- より粘りけがない流体は、自然対流による誤差の影響を受けやすいため、場合によっては増粘安定溶液を使用する。

KD2Pro で測定できる水と水溶液の熱伝導率は、およそ 50℃の範囲までで、水より粘りのない流体の熱伝導率を測定することはできない。

References

Campbell, G.S., C. Calissendorff, and J.H. Williams. 1991.

Probe for measuring soil specific heat using a heat-pulse method. *Soil Science Society of America Journal* 55: 291-293.

Campbell, G.S., and J.M. Norman. 1998. *An introduction to Environmental Biophysics*. 2nd edition. Springer-Verlag, New York.

Ochsner, T.E., R. Horton, and T. Ren. 2003. Use of the dual-probe heat-pulse technique to monitor soil water content in the vadose zone. *Vadose Zone Journal* 2:572-579.

Inc. All