

1 目的

熱物性値推定法の 1 つとして、逆問題解を利用する方法がある。その方法を用いて温度伝導率 a と熱伝導率 λ を同時に推定するために、円筒形容器内の試料をその中心に設置したヒーターで加熱し、その時の試料内の半径方向温度およびヒーター積算加熱量の測定を行った。本研究の目的は測定精度を向上させるための測定容器と解析プログラムの改良を行って異なる測定法で得られた熱物性値の比較により推定精度の検証を行うことである。

2 非定常熱伝導逆問題解析による熱物性値の推定方法

図 1 に示すような中空円筒領域の温度分布は熱伝導逆問題解析により未知数として温度伝導率 a を含む関数として求まるので、温度伝導率 a は 2 組の測定点 (r_1, r_2) と (r_1, r_3) の測定温度から推定した表面温度 T_{w12} と T_{w13} が一致する条件から求まる。具体的には式(1)より二乗偏差の積分値 $Er(a)$ が極小となる条件から温度伝導率 a が推定できる。また、式(1)より温度伝導率 a は既知なので試料内の温度分布より求めたヒーター表面の温度勾配は (r_1, r_2) の測定温度から関数として求まるので、ヒーター入力電力より積算加熱量 Q_{12} を測定すると式(2)から熱伝導率 λ が推定できる。

$$\frac{dE_r(a)}{da} = \frac{d}{da} \int_{t_{init}}^{t_{close}} (T_{w12}(t, a) - T_{w13}(t, a))^2 dt = 0 \quad (1)$$

$$Q_{12} = \int_{t_{initq}}^{t_{close}} q_w(t) dt = -\lambda \int_{t_{initq}}^{t_{close}} \left. \frac{\partial T}{\partial r} \right|_{r=r_0} dt \quad (2)$$

3 実験装置と実験方法

図 2 に実験装置全体図を示す。装置中央にはヒーターが設置されており、熱電対は図 1 に示すようにおよそ 2mm 間隔で設置されている。容器への熱電対の挿入は、円周方向から等温線に沿った軸方向に変更して測定誤差を小さくした。

試料にはパラフィンを用いた。熱電対の位置を計測した後、熔融パラフィン（融点 80）を容器に流し込み、凝固させて測定容器内に均一に充填させた。パラフィンの温度が定常になっていることを確認後、ヒーターで加熱を開始し、試料内の温度履歴を 3 本の熱電対で測定した。

4 実験結果と考察

4.1 パラフィンの密度、比熱、熱伝導率の測定結果

密度 ρ は恒温槽内で、ガードン比重瓶で測定したパラフィン体積をその質量を除いて求めた。比熱 c は水熱量計を用いて測定した。熱伝導率 λ は非定常細線熱線法を用いて測定した。温度伝導率 a は $a = \lambda/(\rho c)$ より算出した。また、不確かさ解析で得られた真値の推定値と不確かさ区間を表 1 に示す。

4.2 逆問題解析による熱物性値推定結果

図 3 にパラフィンの測定データの代表例と逆問題解析により推定された表面温度と表面熱流束を示す。式(1),(2)の推定区間は $t_{init} = 60$ s, $t_{initq} = 76$ s, $t_{close} = 300$ s とした。図中、実線は測定温度より式(1)で求めた a に基づき推定された表面温度 T_{w12} と T_{w13} を示す。破線は (r_1, r_2) での測定温度から式(2)で求めた λ に基づいて推定された表面熱流束 q_{w12} を示す。一点鎖線は、ヒーターへの入力電力をヒーター表面積で除したヒーター熱流束 q_{wh} を示す。

図 3 より、 T_{w12} と T_{w13} および q_{w12} と q_{wh} はいずれも熱物性値を推定した積分区間でかなり良く一致していることが分かる。今回、積分開始時刻を決定するための基準を決めた。式(1)の表面温度の積分開始時刻 t_{init} は、 T_{w12} と T_{w13} の温度差が 0.5 以下になる時刻とした。式(2)の表面熱流束の積分開始時刻 t_{initq} は、 q_{w12} と q_{wh} の相対誤差が 5% 以下に到達する時刻とした。なお、この方法により決定された物性値は、厳密解の温度変化を用いた推定精度の検証により 5% 以下となることが確認されている。

図 4 にパラフィンの a, λ の実測値と逆問題解析による推定値を示す。図中、実線と破線は実測値とその不確かさ区間の上限と下限値を示し、○ と △ のシンボルは 3 回測定が行われた逆問題解析による熱物性の推定値を示す。

ρ, c, λ を個別に測定するには多大な手間と 4 つの測定器を要するのに対して、本測定ではデジタル電圧計と熱電対を設置した測定容器の計 2 つの測定器を使って定常待ち時間を除くと 300 s ほどで測定は終了し、解析時間を含めても 10 分以内で同程度の精度で熱物性値が簡単に得られる。この点は、本測定方法が他の方法よりも優れていると言えよう。

5 結論

異なる測定原理に基づく熱物性値測定結果との比較から、本測定法による測定結果は個別に測られた熱物性値の不確かさ区間内で一致することが分かった。

最後に、細線加熱法による熱伝導率測定では、三菱重工業 池田氏および MHI ソリューションテクノロジー吉村氏に大変お世話になった。ここに記して謝意を表する。

表 1 パラフィンの熱物性値の測定結果

	実測値	不確かさ区間
密度 ρ (kg/m ³)	917.9	±10.3
比熱 c (kJ/kg/K)	2.011	±0.440
熱伝導率 λ (W/m/K)	0.293	±0.024(±5%)
温度伝導率 a (m ² /s)	1.59×10^{-7}	±0.37 × 10 ⁻⁷

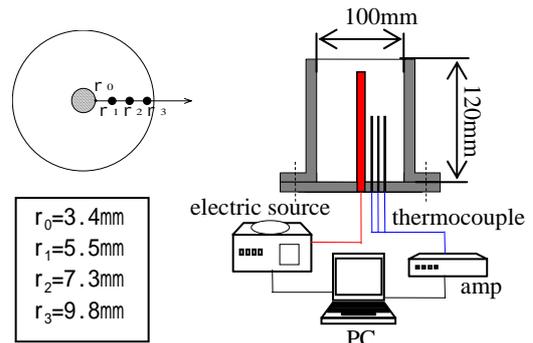


図 1 中空円筒領域 図 2 実験装置全体図

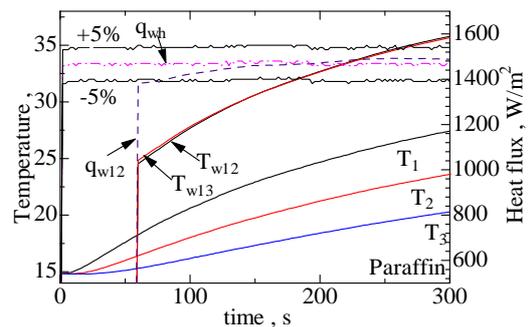


図 3 試料内の温度上昇および T_w と q_w の推定値

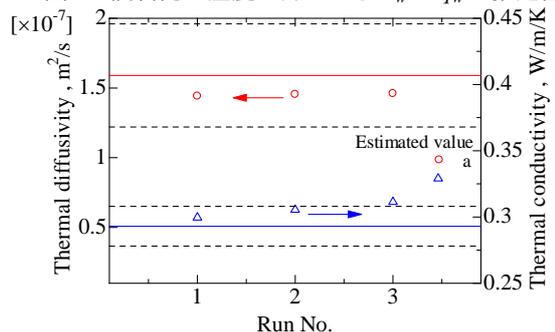


図 4 a, λ の実測値と逆問題解析による推定値の比較