

熱モードスペクトロスコピーを用いた微小試料に対する新しい熱伝導率計測法の開発

Development of thermal-mode spectroscopy

for measuring thermal conductivity of minute specimen

○ 石原 達也, 荻 博次, 石田 秀士, 平尾 雅彦 (阪大院 基礎工), マリス ハンフリー (ブラウン大)

○ Tatsuya Ishihara, Hirotsugu Ogi, Hideshi Ishida, Masahiko Hirao

(Osaka Univ. Grad. Sch. of Engineering Science), Humphrey Maris (Brown Univ.)

E-mail: ogi@me.es.osaka-u.ac.jp

ダイヤモンドは極めて高い熱伝導率を示すが、同位体炭素原子 ^{13}C の含有率を天然比の約 1% から 0.1% まで減らすことにより熱伝導率の室温値がさらに約 50% 上昇するという報告もある^[1]。しかし、試料の微小化と熱伝導率の向上に伴い既存の手法では計測の信頼性に疑問が残ると考える。そこで我々は、ダイヤモンドの熱伝導率に関する同位体効果の精密な計測を見据えて、熱モードスペクトロスコピー (Thermal-Mode Spectroscopy: TMS) 法という新しい概念に基づく計測手法の確立を目指す。従来法は全て熱の伝導現象を利用しており、微小かつ熱伝導率の高い試料に対しては、原理的に測定精度が低下する。これに対して、TMS 法は熱の共振現象を利用しているために、そのような試料に対してむしろ測定精度が向上する。

熱伝導方程式は温度場が「過減衰の波動性」を持つことを示しており、我々が観測する「熱モード」とはこの波動性に起因する熱振動の強め合い・弱め合いによって生じる現象であり音響共振と同様にモードを有する。

本研究はリッツ法を用いて任意形状の試料に対しても適用可能な解析法を新たに開発した。温度の空間分布を f 、密度、熱伝導率、比熱容量をそれぞれ ρ 、 κ 、 c としたとき汎関数として

$$\delta\Pi(f) \equiv \frac{\rho c}{\tau} \int_V f \delta f dV + \kappa \int_V \nabla^2 f \delta f dV$$

を定義すると、基底関数 ϕ による重ね合わせ $f = \sum_m a_m \phi_m$ と変分原理 $\frac{\partial \Pi}{\partial a_m} = 0$ より

$$(\lambda \mathbf{M} - \mathbf{\Gamma}) \mathbf{a} = 0 \quad (1)$$

のような固有方程式を導く。ただし、

$$\lambda = \frac{\rho c}{\kappa \tau} \quad (2)$$

$$M_{mn} = \int_V \phi_m \phi_n dV, \quad \Gamma_{mn} = \int_V \frac{\partial \phi_m}{\partial x_i} \frac{\partial \phi_n}{\partial x_i} dV$$

である。式 (1), (2) に示すように各モードの温度分布は固有ベクトルより、緩和時間は固有値より得る。従って、熱モードによる温度緩和時間 τ を測定し、モード解析値と比較することによって試料の熱伝導率を算出することができる。

我々が提唱する手法が任意形状に適用可能であることを証明するため、例として四面体形状を持つ試料に対して解析と実験を行う。図 1 に四面体の斜面における熱共振モードの温度分布例を示す。図 2 のような光学系を構築し、ポンプ光による熱モードの励起と、プローブ光の反射率変化より温度緩和の観測を行う。

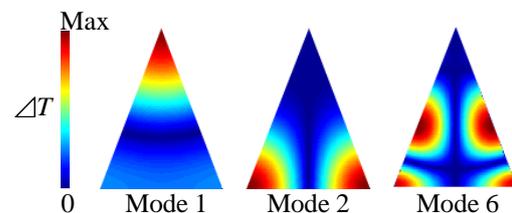


図 1: Calculation of some thermal modes in tetrahedron specimen.

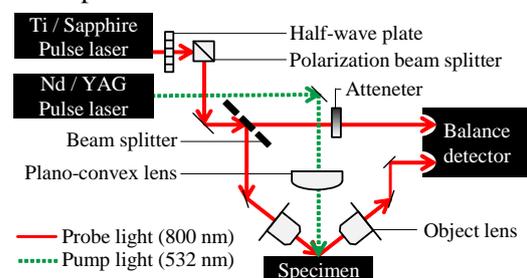


図 2: Schematic of the measurement system.

[1] L. Wei, P. K. Kuo, R. L. Thomas, *etc.* Phys. Rev. Lett. **70**, 3764 (1993).