

# フォトサーマル赤外検知法による 断熱材の熱特性リモートセンシングに関する研究

80121064 石井裕子 指導教員 長坂雄次 教授

## 1. 緒言

住宅内で消費されるエネルギー量は近年ますます増加傾向にあり、省エネルギーを目的とした住宅の高断熱・高気密化が進んでいる。平成 11 年に改正された「次世代省エネルギー基準」の中でも、住宅の高断熱化が省エネルギー性を高める有効な対策であることが示され、断熱材の性能向上およびその評価は大変重要になってきている。断熱材は結露等の水分の影響でその性能が低下してしまうため、住宅の壁として使用中の断熱材の熱特性とその劣化を知ることが必要である。しかしながら、断熱性能の定量的な評価手段として従来用いられてきた定常法等の測定方法は、測定装置が大掛かりで持ち運びが困難であるため、測定用に断熱材を切り出す必要があり、使用中の材料を測定することは不可能であった。

本研究では、試料に対して非接触・非破壊かつ局所的に測定可能なフォトサーマル赤外検知法を用いた測定技術を用いて、断熱材の熱特性リモートセンシングに向けて応用することを目的としている。

## 2. 測定原理

本研究で用いた測定方法は、フォトサーマル赤外検知法である。光強度を正弦波変調したレーザーで試料表面を加熱すると、試料が光を吸収し内部に周期的な温度変化が起こる。この温度変化に応じて、試料から放出される熱放射エネルギーも周期的に変化する。この放射エネルギーの変化は加熱光の変調周波数に対して同周波数で変化するが、その周期は位相遅れを伴う。この位相差  $\Delta\phi$  は試料の物性値等の情報を含んでおり、ある変調周波数範囲で測定して得られる周波数-位相差曲線について解析を行うことで、試料の熱物性値を求めることが原理的に可能である。本測定方法で得られる位相差  $\Delta\phi$  は以下のパラメータに依存する。

$$\Delta\phi = F(f; e_g/e_m, e_s/e_m, k_m, l_m, \beta_m) \quad (1)$$

$$e_i = \sqrt{\lambda_i \rho_i c_i} : \text{熱浸透率} [W \cdot s^{1/2}/m^2/K]$$

$$k_i = \sqrt{\pi f / a_i} : \text{温度波の波数} [m^{-1}] \quad a_i : \text{温度伝導率} [m^2/s]$$

$$\rho_i : \text{密度} [kg/m^3] \quad c_i : \text{定圧比熱} [J/kg/K] \quad l_i : \text{試料厚さ} [m]$$

$$\lambda_i : \text{熱伝導率} [W/m/K] \quad \beta_i : \text{吸収係数} [m^{-1}]$$

SUBSCRIPT  $i = g, m, s$  ( $g$ : 気体,  $m$ : 金属箔,  $s$ : 試料)

## 3. 測定装置

測定装置の概要を Fig. 1 に示す。加熱光源には、波長 810nm、出力がファイバ端で最大 30W の半導体レーザーを用いている。従来、出力 450mW のレーザーを用いていたが、3 次元熱伝導の影響を緩和するために加熱径を拡げて測定を行うと、レーザーのエネルギー密度が小さくなるため、熱放射の信号も小さくなり測定が困難である。そこで、高出力でビーム径可変のレーザーを新たに導入した。ファンクションジェネレータにより正弦波変調したレーザーで試料表面を周期的に加熱することで内部に周期的な温度変化を生じさせ、その温度変化に伴う熱放射エネルギーの変化を対の非軸パラボラリフレクタを用いて集光し、IR フィルタを介し赤外線検出器で検知する。

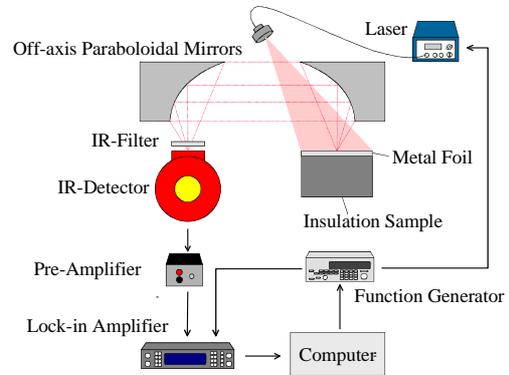


Fig. 1 Experimental Apparatus.

検知した信号をプリアンプにより電圧信号に変換し、ファンクションジェネレータからの変調信号と共にロックインアンプに入力し、両者の位相差を測定する。

断熱材試料表面に金属箔を押し付けて測定を行うことにより、レーザー照射面での熱損失の寄与を表す Biot 数が小さくなり、対流の影響が抑制されている。また 3 次元熱伝導の影響を受けにくい高周波領域での測定を可能にしている。

## 4. 3次元熱伝導の影響

フォトサーマル赤外検知法において試料の厚さ方向の情報を知るためには、試料が厚いほど低周波での測定が必要になる。低周波領域の測定においては熱拡散長が大きくなり、熱の移動が試料の厚さ方向のみであるという 1 次元熱伝導の仮定が崩れ、試料の半径方向にも熱が広がっていく 3 次元熱伝導が測定に影響を与えていると考えられる。

3 次元熱伝導の影響を受けていると考えられる場合 3 次元理論 [1] に基づいた解析を行うべきであるが、その際にはレーザーのガウス半径、リフレクタの集光半径、試料半径の正確な測定が必要となり、誤差要因を増やすことになりかねない。従って、現在の測定装置を利用する場合、熱伝導の 1 次元性を確保する工夫をすることが有効な解決策であると考えられる。1 次元性を確保する方法として、レーザーのガウス半径つまりビーム径を拡げて試料を全面にわたって加熱すること、リフレクタの集光半径を拡げて試料表面の広範囲の温度変化を検知することが挙げられる。今回、加熱光源にビーム径可変のレーザーを導入し、試料全面加熱測定を行った。

## 5. 測定結果及び検討

測定対象として、主にグラスウール(以下 GW)を用いた。GW の熱伝導率は(財)建材試験センターの平板直接法により測定されており、その他の物性値についても同センターで測定されている。本研究では、新しい測定法の開発を行っているため、標準試料の推奨値と測定値を比較することで測定方法の妥当性を確認している。

測定は 1Hz ~ 10kHz の周波数領域で行った。Fig. 2 に、厚さ 25mm の GW に厚さ 50 $\mu$ m の Ti 箔を押し付けて測定を行った時に得られた周波数-位相差曲線、および 1 次元熱伝導に基づ

く理論曲線を示す．なお，この時レーザの出力はファイバ端で 2.2W，ビーム径は約 30mm であり，試料に対して全面加熱を行った．比較のために，同様の試料を従来の出力 450mW のレーザを用いてビーム径約 1.5mm で加熱を行った測定結果も示す．Fig. 2 より，ビーム径を拡げて試料表面を全面にわたって加熱を行うことで，より低周波領域まで 1 次元熱伝導を確保することを確認した．約 10Hz 以下は 3 次元熱伝導の影響を受けていると見られ，1 次元理論曲線の下側に位相差がシフトするが，加熱径 1.5mm の場合と比べて，解析範囲を大幅に広げることが可能となった．

以上より，熱放射の検出領域に比べて加熱領域を十分に大きくすることによって，試料の面方向への熱の逃げを無視することができるため，3 次元熱伝導の影響を緩和が可能であることを実験的に確かめた．

### 5.1 加熱領域と熱放射検出領域のずれの影響

測定に使用したレーザは拡がり角を持っており，試料上で最小でもビーム径は 10mm である．これに対し，リフレクタの集光半径は約 2mm，赤外線検出器の素子のサイズは 1mm<sup>2</sup> であるため，装置の光学系を設定する際に，加熱領域の中心と熱放射の検出領域がずれてしまうことが考えられる．そこで，このずれが測定される位相差に与える影響を見積った．

Fig. 3 に，厚さ 25mm の GW に厚さ 50 $\mu$ m の Ti 箔を押し付けた測定において，加熱径をパラメータとして，熱放射の検出領域が加熱領域の中心から試料の半径方向にずれた場合の位相差の変化を示す．なお，この時の変調周波数は 10Hz，リフレクタの集光半径は 2mm とした．Fig. 3 より，加熱径が大きいほど，中心からずれた場合の位相差の変化は小さいことがわかる．また，周波数が低くなるほどこのずれの影響は大きくなる．新たに導入した，試料表面を全面にわたって加熱する方法においては，熱伝導の 1 次元性が成立しやすいために，熱放射を集光するための光学設定の精度は数 mm 程度で十分であることがわかる．このことは，本装置を用いてその場測定を行う場合非常に有利であると言える．

### 5.2 接触熱抵抗の影響

本測定において，金属箔を断熱材試料に押し付ける場合，両固体間に空気が入り込んでしまうことが考えられる．この時金属箔，断熱材試料両固体の接触面における温度は一致しないため，接触熱抵抗を考慮する必要がある．そこで，新たに接触熱抵抗  $R$  を考慮に入れた理論を解いた．

Fig. 4 に，Ti 箔-GW 間の  $R$  をパラメータとして，計算した結果を示す．図より， $R$  が  $10^{-4} \sim 10^{-3} \text{ m}^2 \cdot \text{K} \cdot \text{W}^{-1}$  オーダ以下ならば位相差にほとんど影響を与えないことが明らかになった．接触熱抵抗の位相差への影響は，約 100Hz 以下の領域で顕著になるが，これは高周波領域では熱拡散長が短く，温度波が金属箔-断熱材試料界面に到達する前に十分に減衰するためだと考えられる．本測定法における接触熱抵抗の大きさは，大まかに見積って  $10^{-4} \text{ m}^2 \cdot \text{K} \cdot \text{W}^{-1}$  オーダ程度であり，測定への影響は無視して良い範囲だとわかった．実際に壁材のその場測定を行うことを想定すれば，金属箔を隙間なく壁に押し付けることは困難である．その影響を無視できることは，その場測定を行う上で有効である．

## 6. 結言

試料を全面にわたって加熱を行うことで，3 次元熱伝導の影響の緩和が可能であることを実験的に確かめた．また，熱放射を集光するための光学設定の精度は数 mm 程度で十分で

あること，金属箔-断熱材試料間の接触熱抵抗の影響は無視できることを理論的に検証した．さらに，紙面の都合上ここでは触れないが，水分を含んだ材料と経年劣化した材料の測定を行い，本測定方法が断熱性能の劣化の評価に有用であることを確認した．以上より，フォトサーマル赤外検知法による断熱材の熱特性その場測定の可能性を示した．

### 参考文献

- [1] Y. Nagasaka, T. Sato and T. Ushiku, *Meas. Sci. Technol.*, 12, (2001), 2081-2088.

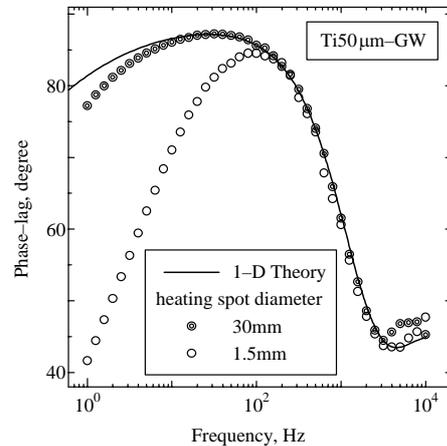


Fig. 2 Effect of expansion of heating spot diameter on frequency vs. phase-lag data of the glass wool.

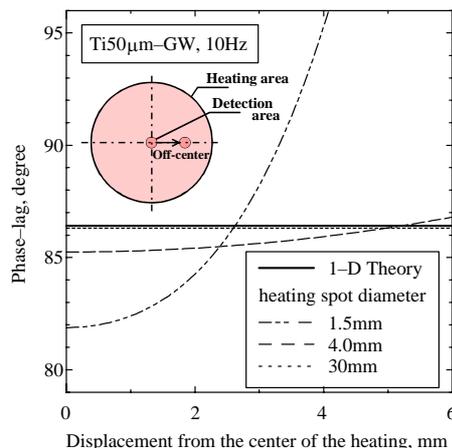


Fig. 3 Effect of off-centering between heating and radiation thermometry spots on the phase-lag.

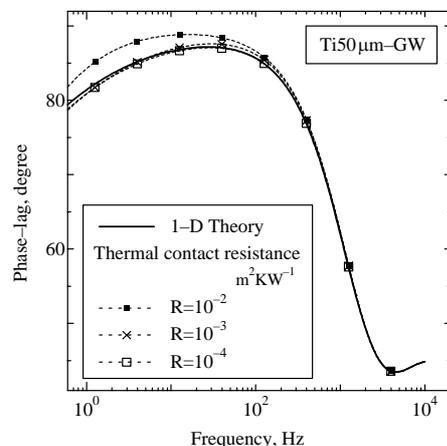


Fig. 4 Theoretical calculation of the effect of thermal contact resistance between metal foil and sample on the phase-lag.