

熱流密度の計測技術

産業技術総合研究所 計測標準研究部門 上席研究員 馬場哲也

1. 伝熱の 3 態

伝熱の機構は、それぞれ異なった物理現象である熱伝導、熱放射、対流熱伝達の 3 態に区分される。本来、熱流とは伝導による熱の移動を表す量であり、放射や対流による熱エネルギーの移動は含まれないが、熱流計には放射や対流による熱エネルギーの移動を測定する測定器をも含めて考えることが多い¹⁻³⁾。実用的熱流計の大部分は温度センサを組み合わせ構成されており検出原理自体は単純である。それにもかかわらず熱流は正確な測定が困難な物理量の 1 つとされている。その主因は、熱エネルギーの流れを変化させずに熱流計センサまで導入することの難しさにある⁴⁻⁸⁾。

(1) 熱伝導 物質の移動なしに熱が物体の高温部から低温部に移動する現象を熱伝導という。熱流は単位時間に物体の対象面を熱伝導で流れる熱量を表す。従って時間 $\Delta t/s$ の間に Q/J の熱量が流れた場合の熱流 φ/W は次式で表される。

$$\varphi = Q/\Delta t \quad (1)$$

単位面積当りに流れる熱流の密度を熱流密度 $q/W \cdot m^{-2}$ といい、熱流計はこの値を測定する。面積 S/m^2 の対象面を φ の熱流が流れた場合の熱流密度 q は次式で与えられる。

$$q = \varphi/S \quad (2)$$

熱放射に対して不透明で、緻密な固体内では一般に熱伝導のフーリエの法則が成立し、熱流密度 q は固体内の温度勾配に比例する。その比例係数 $\lambda/W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$ は熱伝導率とよばれ、材料と温度によって定まる熱物性値である。

従って、熱伝導率 λ 、厚さ d の平板の両側の温度差が ΔT のとき平板を貫通して流れる熱流密度の大きさは、

$$q = \lambda \frac{\Delta T}{d} \quad (3)$$

(2) 熱放射 物体から熱エネルギーが電磁波として放出される現象を熱放射といい、その強度と性質は温度と物質の種類により定まる。放出された電磁波は波長や偏光方向などの属性をもつが、熱流計測では熱放射をエネルギーの移動形態としてとらえ、固体表面で吸収される熱放射のエネルギー密度(熱流密度と同一単位, $W \cdot m^{-2}$)と、固体表面から放射される熱放射のエネルギー密度の収支が測定対象となる。

(3) 対流熱伝達 流体の移動によって熱が伝えられる現象を対流熱伝達という。流体の移動の原因が温度勾配であるものを自然対流熱伝達、圧力勾配などの外力によるものを強制対流熱伝達と区別する。

2. 熱流計センサ

(1) 構造

熱流計センサの代表的構造を図 1 に示す。

熱抵抗体の両面間に生じる温度差を熱電対を直列に接続したサーモパイルにより検出して、センサを貫通する熱流密度を測定する。熱抵抗体の厚さが d 、熱伝導率が λ であるとき、センサを貫通する熱流密度 q は (3) 式で与えられる。

熱流計のサーモパイル出力は同一熱流密度に対してもセンサ温度に依存して変化するので注意が必要である。その原因として、熱電対の熱起電力が温度差に完全には比例しないこと、熱抵抗体の熱伝導率が温度依存性をもつことが挙げられる。市販の熱流計は、温度センサを内蔵し、熱流計出力の温度変化を自動的に補正して、熱流密度の値を表示するものが多い。

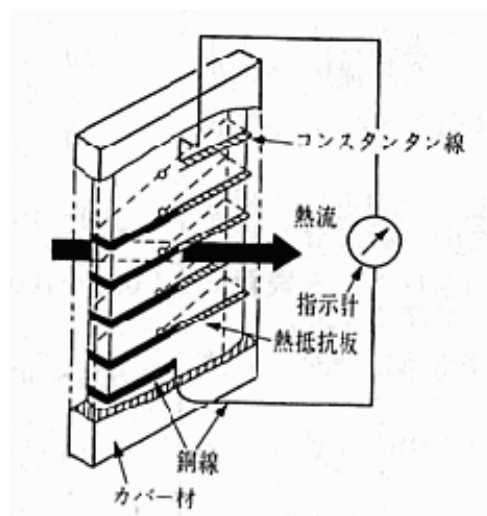


図 1 熱流計センサの構造

(2) 校正法

熱流計の校正は、センサ内外での熱流密度が等しく、センサに垂直に一樣な熱流が流れる乱れのない状態で行うことが基本である⁹⁾。しかし現在市販されている製品は必ずしも上記の理想条件下では校正されていない¹⁰⁾。従って、熱流密度の絶対値を評価したい場合には、使用するセンサが、どのような考え方で、どのような方法で校正されているかを熱流計メーカーに確認しておかねばならない。

3. 埋設式使用法

熱流計を固体中や粉体中に埋設する使用法における最大の問題は、測定対象の熱伝導率 λ_0 とセンサの熱伝導率 λ の違いによる熱流の乱れの発生である⁶⁾。十分大きな測定対象中に熱流と垂直にセンサを設置した場合の熱流状態の変化を図 2 に示す。

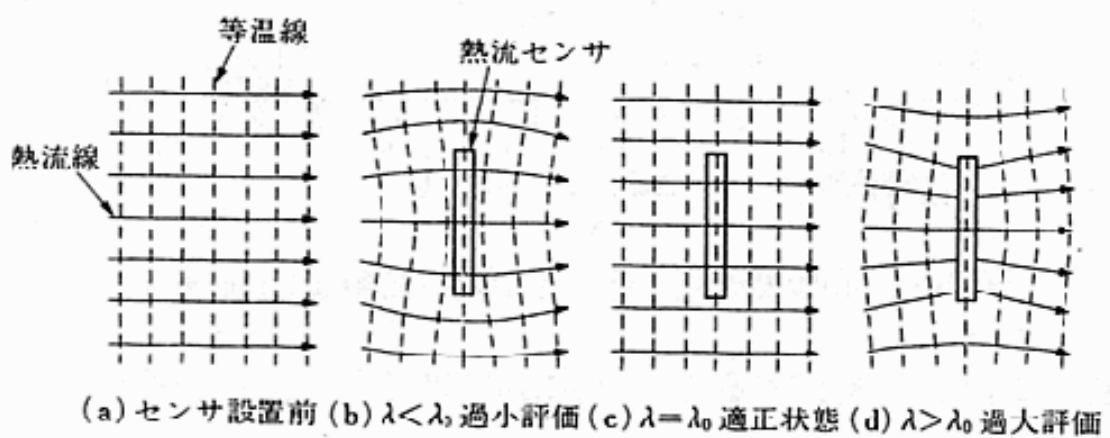


図 2 熱流計センサの埋設による熱流の乱れ

(a)はセンサ設置前, (b)は $\lambda < \lambda_0$, (c)は $\lambda = \lambda_0$, (d)は $\lambda > \lambda_0$ のセンサを設置した状態に対応している。(c)の状態では正しい熱流密度が得られるが, (b)では過小な値, (d)では過大な値が得られる。

この状況は静電気学で, 一様な外部電場 (電位勾配) 中に誘電率 ϵ の誘電体をおいたときに電束密度 D の分布を求める問題と等価である ($\phi \rightarrow T, D \rightarrow q, \epsilon_0 \rightarrow \lambda_0, \epsilon \rightarrow \lambda$)。薄板状センサを, 長軸 a , 短軸 b ($a \gg b$) の扁平回転楕円体で近似すると, センサ埋設前の熱流密度 q_0 に対する埋設後のセンサを貫通する熱流密度 q の比は次式で熱流計操作誤差の解析与えられる⁶⁾。

$$\frac{q}{q_0} = \frac{\lambda/\lambda_0}{1+(\lambda/\lambda_0-1)n} \quad (4)$$

ここで, n は $0 < n < 1$ の無次元数であり, 長軸と短軸の比 $p = a/b$ の関数として図 3 のように変化する⁶⁾。

測定対象の大きさがセンサに対して無限大とみなせない場合や, 扁平回転楕円体と円板との差の影響 ($a \gg b$ では微小) は (4) 式中の n の差として表れる。

熱流計を測定対象に埋設して使用する場合の注意を列挙する。

i) センサの選択

a) 測定対象の熱伝導率 (λ_0) に近い熱伝導率 (λ) をもつセンサを使用する (理想上は $\lambda = \lambda_0$)。 $\lambda < \lambda_0$ よりも $\lambda > \lambda_0$ が望ましい。

b) 薄くて面積の広いセンサを使用する ($p = a/b$ 大)。

ii) センサ設置時の注意

a) 熱流が流れる方向に垂直にセンサを設置する。垂直から傾くと過小な値が得られる。

b) センサと測定対象の間に空気層などのすきまを生じないように設置する。空気の熱伝導率は一般の熱流計に比べて $1/10 \sim 1/100$ 程度に小さく, わずかなすきまでも熱流の乱れを生じる。

4. 表面貼付式使用法

(a) 自然対流下の大気中での使用 熱流計を固体表面に設置する使用法では, センサの裏面から熱伝導で流入し, 表面から熱放射と対流によって放散される熱流を測定する。この測定法では熱伝導以外に熱放射と対流が関与するので, 熱伝導のみが

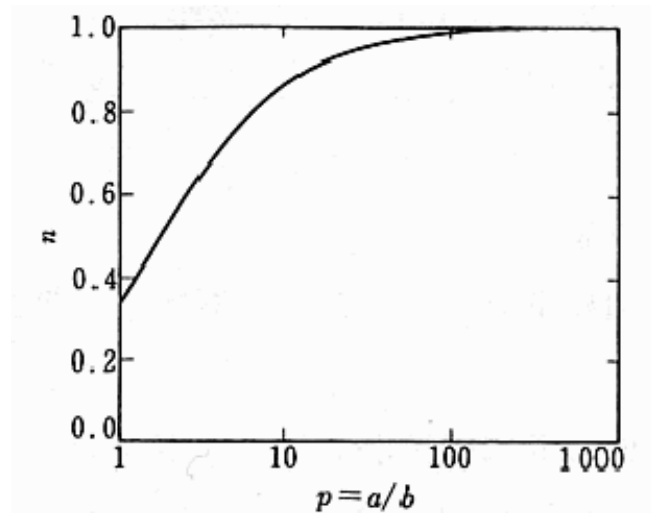


図 3 熱流計センサ埋設時の $p \cdot n$ の関係 (センサの計上を扁平回転楕円体により近似)

関与する埋設式使用法と比較すると、測定の不確かさは大きくなりやすいが、センサ設置が容易さにあるので、断熱壁からの熱損失の測定などに広く用いられている。

大気中にある壁面から外界への熱伝達は熱放射と対流熱伝達の和であり、定常状態では図 4(a)の等価回路で記述できる。熱流計設置後にはセンサの熱抵抗をも考慮する必要がある、センサが薄く内部では 1 次元熱流とみなせる場合には図 4(b)の等価回路で表せる。

ここで h_0 , h はそれぞれセンサ設置前後の対流熱伝達係数, ε_0 は壁面の ε はセンサ表面の半球全放射率, R はセンサの熱抵抗である。壁面(センサ設置前温度 T_0 , 設置後 T から外界(温度 T_∞) までの合成熱伝達係数を, K_0 (センサ設置前), 及び K (センサ設置後) と定義すると次式で表される。

$$K_0 = h_0 + \varepsilon_0 k_0 \quad (5)$$

$$k_0 = \sigma(T_0^3 + T_0^2 T_\infty + T_0 T_\infty^2 + T_\infty^3)$$

$$K = \frac{1}{R + \frac{1}{h + \varepsilon k}} \quad (6)$$

$$k = \sigma(T_s^3 + T_s^2 T_\infty + T_s T_\infty^2 + T_\infty^3)$$

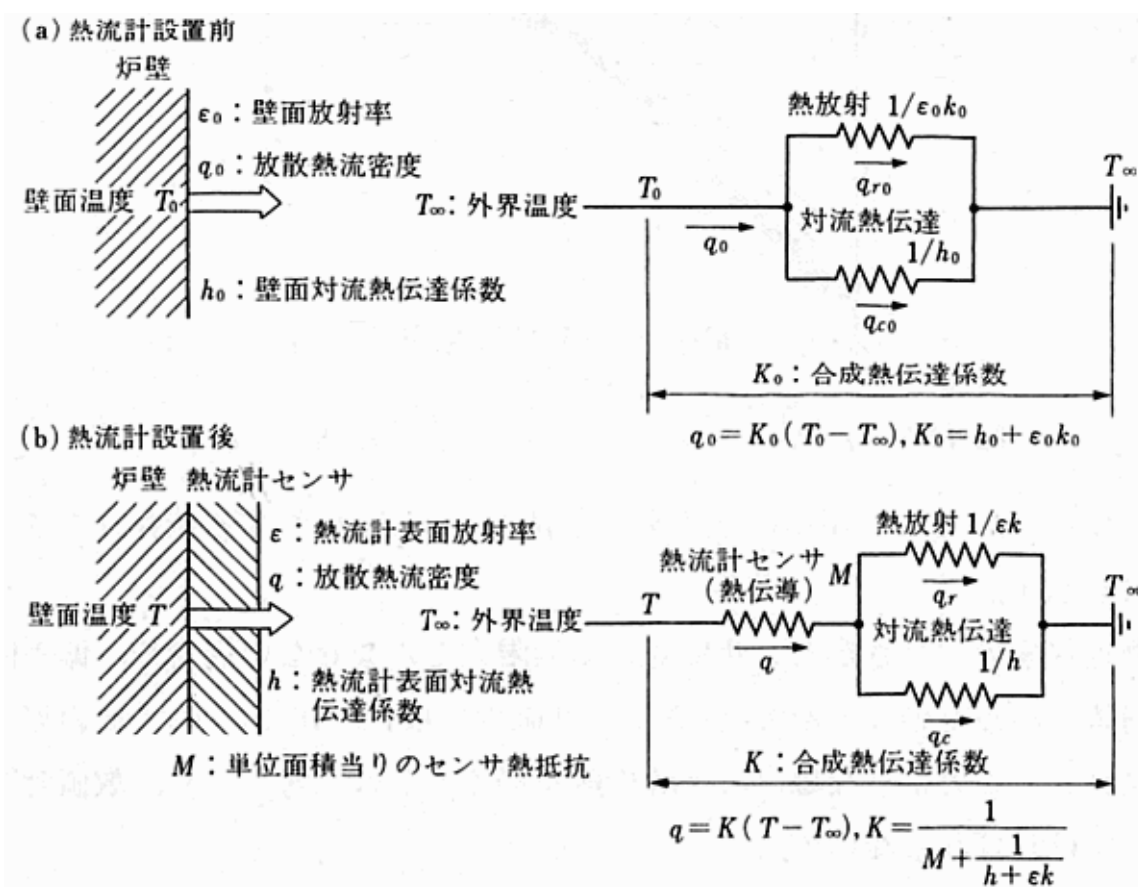


図 4 熱流計センサを測定対象表面に貼り付けて熱流密度を測定する場合における熱伝導の等価回路

ただし σ はステファン-ボルツマン定数、 T_s はセンサの表面温度である。
埋設式使用法の $\lambda = \lambda_0$ の状態に対応して、表面貼付式使用法では $K = K_0$ が適正状態である。この状態は厚さが無限小で表面の半球全放射率が壁面と完全に等しいセンサにより実現されるが、市販のセンサはそのような条件を満たしておらず、 $K \neq K_0$ となる。表面温度 100°C 程度の垂直壁面に市販のセンサを設置した場合、 $|K - K_0|/K_0$ が数 10% に達することも珍しくない。

このとき、センサ設置前に壁面を貫通していた熱流密度 q_0 と設置後のセンサを貫通する熱流密度 q との間には、埋設時と類似の次式が成立する。

$$\frac{q}{q_0} = \frac{K/K_0}{1+(K/K_0-1)N} \quad (7)$$

N は測定対象の壁の性質、センサの面積及び K_0 によって定まる $0 < N < 1$ の無次元数である、例えば、厚さ無限大、熱伝導率 λ_0 、外界との合成熱伝達係数 K_0 の半無限壁面上に半径 r の円板状センサを設置した場合、 N は $P = K_0 r / \lambda_0$ の関数として計算できる。

さらに壁面に熱伝導率の大きい金属板（厚さ無限小、2次元の熱伝導率 $\Lambda / W \cdot K^{-1}$ として解く）が貼られている場合も $\Pi = K_0 r^2 / \Lambda$ をパラメータとして計算可能であり、図 5 に両者を合わせて示す。センサが円板状でない場合や壁の厚さが有限であるような場合はこの値が変化する。

以上の結果から、合成熱伝達係数の変化率が等しい (K/K_0 一定) 場合には、センサの面積が大きいほど (r : 大)、壁材の熱伝導率が小さいほど (λ_0, Λ 小) 測定誤差は小さくなることがわかる。ちなみに、通常の断熱れんが ($\lambda_0 = 0.1 / W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$) よりなる外気に接した垂直壁面 ($K_0 = 10 / W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$) に半径 $r = 0.05 / m$ の円板状センサを貼った場合 ($P = 5$) には $N = 0.7$ 、さらに、表面が厚さ 2 mm の鉄板 ($\Lambda = 0.1 W / K$) で補強してある場合 ($\Pi = 0.25$) には $N = 0.14$ となる。

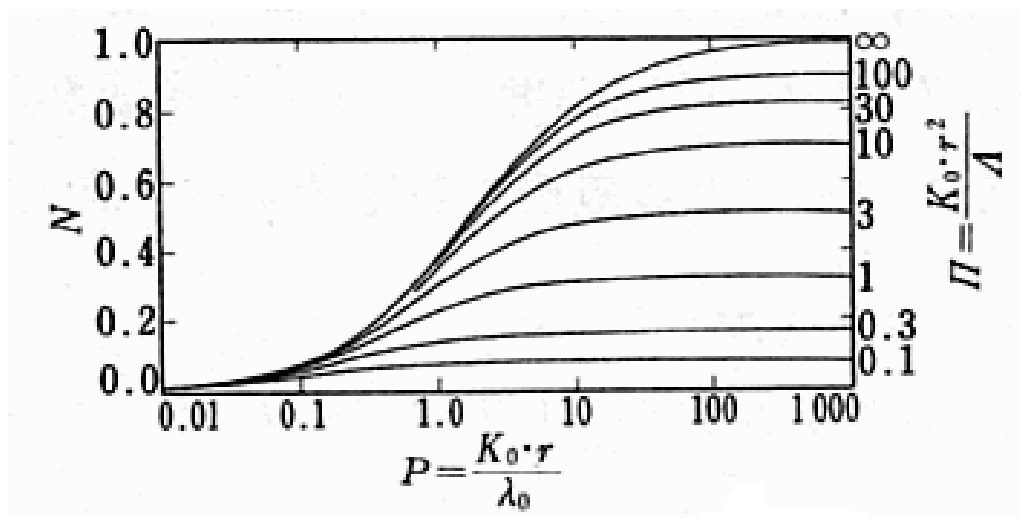


図 5 熱流計センサを測定対象表面に貼り付けた時の $\Pi-N$ の関係

熱流計を測定対象表面に貼付けて使用する場合の注意を列挙する。

I) センサの選択

- a) 使用可能なセンサの中で最も薄いものを用いる。
- b) 面積の広いセンサを用いる。

II) センサ貼付時の注意

- a) センサ表面の放射率を測定対象面に一致させる。それには下記の方法が考えられる。
 - ① センサ表面に、測定対象面と同じ塗装を行う。
 - ② センサ表面に、測定対象面と同じ材質の薄板を接着する。
 - ③ 実効的な放射率が測定対象面と等しいシートを作成し、センサ表面に接着する。
 - ④ センサと測定対象面の間に空気層などのすきまを生じないように一様に密着させる。

5. 応用分野

熱エネルギーの流れを実測することはエネルギーの有効利用を実現するために不可欠である。これまで伝熱状態の計測は熱電対などを用いた温度測定に依存してきたが、熱流計によれば熱エネルギーの移動を直接測定することが可能である。

従来の熱流計センサは厚さが数 mm で一辺数 cm 以上の平板であり、測定対象は窯炉の外壁や建築の壁面などが主な測定対象であったが、近年、熱流計センサの小型化が進み、厚さが 1 mm 以下、一辺 1 cm 以下のものが開発されている。その結果、これまでに普及している利用分野に加えて、研究開発における熱流測定・熱制御、熱測定機器・熱物性計測器の

コンポーネントとしての応用など広汎な利用分野の拡大が期待される。

参考文献

- 1) 栗野他：熱流計測特集，計測技術，8 (1980) 27-60.
- 2) 服部晋：熱流(量)の測定，熱計測技術(日本機械学会編)，(朝倉書店，1986) 25-42.
- 3) 炭竈貞夫：熱センサ入門（啓学出版，1984）123-214.
- 4) T. Baba, A. Ono and S. Hattori: Analysis of the Operational Error of Heat Flux Transducers Placed on Wall Surfaces, Rev. Sci. Instrum., 56 (1985) 1399-1401.
- 5) 馬場哲也，服部晋：熱流計操作誤差の解析，計測技術，13 (1985) 42-48.
- 6) 馬場哲也：埋設式熱流計の操作誤差の解析，計量研究所報告，34 (1985) 271-276.
- 7) 馬場哲也：第 10 章 熱流センサ，センサの原理と使い方(3)（コロナ社，1984）130-148.
- 8) <http://www.nrlm.go.jp/section/Joho/heat/>
- 9) 花田百合男：熱板方式による熱流計目盛の検討，計量研究所報告，36 (1987) 1-9.
- 10) 花田百合男，服部晋：熱流標準の調査，計測技術 8 - 3 (1980)，31-40.