



# 入門講座

伝熱工学-2

## 伝導伝熱 Conductive Heat Transfer

永井二郎 福井大学 学術研究院工学系部門  
Niro Nagai 機械工学講座 教授

### 1 はじめに

今回は、前回の「伝熱基礎」で紹介された3つの伝熱様式(伝導、対流、ふく射)の内、伝導伝熱を解説する。前回と一部内容が重複することを、あらかじめ了承したい。物質内に温度分布が存在する場合、物質の種類(固体、液体、気体)を問わず、物質を構成する分子間でエネルギーを交換しながら熱が輸送される。このような伝導による伝熱のことを、伝導伝熱あるいは熱伝導と呼ぶ。以下、用語を「熱伝導」で統一する。

### 2 熱伝導のフーリエの法則と熱伝導率

#### 2.1 フーリエの法則

図2-1上図に示すように、厚さが $L$  (m) で断面が矩形の物質(例えば銅板)があり、ある時刻において左側表面温度 $T_0$  (K) が右側表面温度 $T_1$  (K) より高い状況を考える。このとき、左側から右側に向かう熱伝導が生じるが、その熱流束 $q$  ( $W/m^2$ ) は一般的には位置により異なる。例えば、図2-1下図に示すように、伝熱方向に $x$ 座標をとり、ある時刻において物質内の温度分布が図中の実線に示される曲線になっている場合、温度勾配 $dT/dx$  は位置により異なる。このとき、局所的な熱流束 $q$ はその位置での温度勾配 $dT/dx$  に比例する。これをフーリエの法則とよび次式で表される。

$$q = -k \frac{dT}{dx} \dots\dots\dots(2-1)$$

ここに、 $k$ は熱伝導率( $W/(m \cdot K)$ )とよばれる物性値である。伝熱方向に $x$ 座標をとると温度勾配 $dT/dx$ は負の値をとるため、熱流束 $q$ が正の値となるように式にはマイナスの符号が付けてある。このフーリエの法則は経験則であるが、超流動ヘリウムを除く全ての物質で成り立つ万能法則である。

次に、物質内の温度分布が図2-1下図の破線で示される直

線になっている場合を考える。このような温度分布は、熱伝導率の値が物質内で一定であり、また定常状態(温度分布が時間に依存しない状況)で内部発熱が無い場合に生じる。この場合は物質内の温度勾配は位置によらず同じ値となり、物質内の熱流束も一定値となり、次式で計算される。

$$q = -k \frac{dT}{dx} = k \frac{T_0 - T_1}{L} \dots\dots\dots(2-2)$$

式(2-2)から、熱伝導の熱流束は、温度差に比例し、板の厚みに反比例し、熱伝導率に比例することが分かる。逆に捉えれば、熱伝導率の値が大きい物質内では温度差が小さくなる(熱伝導率の値が小さい物質内では温度差が大きくなる)傾向があることも分かる。式(2-2)は簡易な式であり、よく利用される関係式ではあるが、前述の通り、いつでも成り立つ式では無いことに注意が必要である。

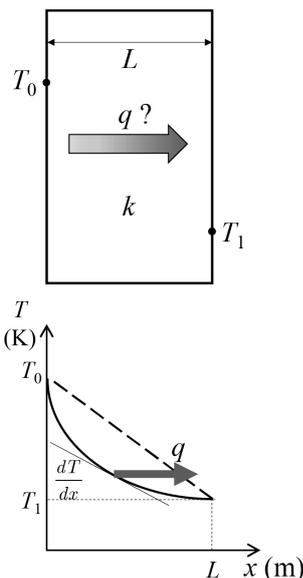


図2-1 温度勾配と熱流束

## 2.2 熱伝導率

熱伝導率 $k$ は、物質の温度・圧力・成分など物質の状態により定まる物性値である。前回の講座で紹介された専門資料<sup>1,3)</sup>やソフトウェアにより、温度依存性も含めた各種物質の熱伝導率を知ることができる。表2-1に代表的な物質の熱伝導率を、図2-2に物質の種類ごとのおよその熱伝導率を示す<sup>4)</sup>。一般的に、固体の熱伝導率が最も大きく、液体、気体の順に小さくなる。断熱材とよばれる素材(例えばグラスウール)は、その固体部分の熱伝導率が小さいのではなく、隙間に存在する気体(空気)の熱伝導率が小さいため、全体の見かけの熱伝導率が小さくなっていることに留意が必要である。図2-2に示される通り、物質の熱伝導率は $10^{-2} \sim 10^3$  (W/(m·K))の狭い範囲に限定されている。いわゆる超熱伝導物質( $k \sim 10^6$  (W/(m·K))以上)や完全断熱材( $k \sim 10^{-5}$  (W/(m·K))以下)は発明されていないが、このような物質が新規に開発されれば、省エネや未利用熱有効活用を通じた脱炭素社会の実現に大きく貢献するものと期待される。

# 3 熱伝導方程式

## 3.1 任意形状物体の温度分布・時間変化と熱伝導方程式

熱伝導に関する基本法則は、式(2-1)のフーリエの法則しかない。では、式(2-1)だけで、問題が解決するか、というところはいかない。図2-3上図に示すように、一般的に形状や寸法が任意の物体があり、この物体の温度分布や時間変化を求める方法を考えよう。物体表面の一部は加熱または冷却され、一部は断熱され、また一部は温度一定になるよう制御されているかもしれない。さらには、鉄鋼材料の相変態による発熱のように、物体内部の一部で発熱が起こっているかもしれない。物体の物性値が分かっている場合、物体の温度 $T$  (K)を座標 $(x, y, z)$ と時刻 $t$  (s)の関数で把握したい。そのためには式(2-1)のフーリエの法則だけでは計算できず、次節で導出する熱伝導方程式が必要となる。

## 3.2 熱伝導方程式の導出と計算

導出過程の詳細は専門書<sup>1,2,4)</sup>を参照することとして、ここでは基本的な考え方を説明する。図2-3下図に示すように、物体の任意の位置における微小検査体積のエネルギーバランスを考える。例えば、ある微小時間 $\Delta t$  (s)における $x$ 方向の熱の流入・流出量は次のように表記できる。

(検査体積の左側表面からの流入熱量  $J$ )

$$q_x \cdot dydz \cdot \Delta t = - \left( k \frac{\partial T}{\partial x} \right)_x dydz \Delta t \dots\dots\dots(2-3)$$

(検査体積の右側表面からの流出熱量  $J$ )

$$q_{x+dx} \cdot dydz \cdot \Delta t = - \left( k \frac{\partial T}{\partial x} \right)_{x+dx} dydz \Delta t$$

$$= \left\{ - \left( k \frac{\partial T}{\partial x} \right)_x + \frac{\partial}{\partial x} \left( -k \frac{\partial T}{\partial x} \right)_x dx \right\} dydz \Delta t$$

\dots\dots\dots(2-4)

したがって、 $x$ 方向の正味の入熱量は次式で表される。

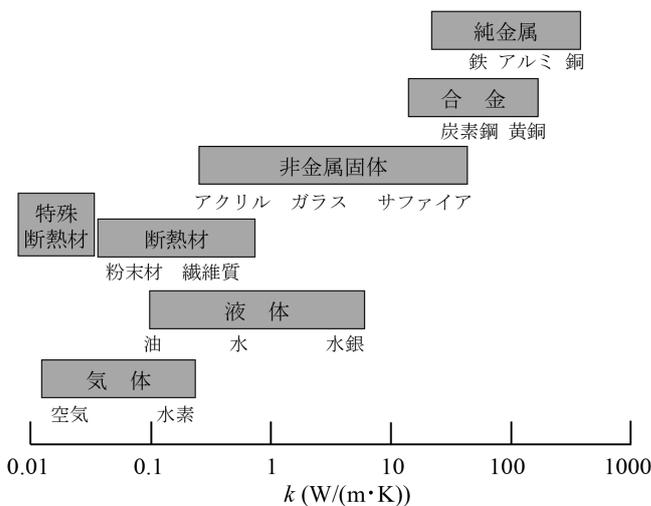


図2-2 各種物質の熱伝導率(文献4)より抜粋・修正)

表2-1 代表的な物質の熱伝導率(常温(300K)、常圧(101.3kPa))<sup>1,2)</sup>

物質	熱伝導率(W/(m·K))	物質	熱伝導率(W/(m·K))
銅	398	ソーダガラス	1.03
アルミニウム	237	アクリル樹脂	0.21
ニッケル	90.5	炉底れんが	1.80
鉄	80.3	グラスウール	0.034
チタン	21.9	水銀	8.52
黄銅(Cu-40Zn)	123	水	0.610
炭素鋼(S35C)	43.0	潤滑油	0.086
ステンレス鋼(SUS304)	16.0	水素	0.181
サファイア	46.0	空気	0.026

$$(q_x - q_{x+dx}) dydz\Delta t = \frac{\partial}{\partial x} \left( k \frac{\partial T}{\partial x} \right) dx dy dz \Delta t \quad \dots\dots\dots(2-5)$$

同様にy方向とz方向の正味の入熱量も評価し、時間Δtにおける正味の入熱量と内部発熱量の和が、検査体積の内部エネルギー変化量と等しくなることから次式を得る。

$$\rho c \Delta T \cdot dx dy dz = \left\{ \frac{\partial}{\partial x} \left( k \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( k \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( k \frac{\partial T}{\partial z} \right) + \dot{q}_v \right\} dx dy dz \Delta t \quad \dots\dots\dots(2-6)$$

ここで、ρは物体の密度 (kg/m<sup>3</sup>)、cは比熱 (J/ (kg・K))、ΔTは時間Δtでの物体の温度上昇 (K)、 $\dot{q}_v$ は検査体積内での単位時間単位体積あたりの発熱量 (W/m<sup>3</sup>) である。ここで、Δt→0の極限を考えると、次の直交座標系における熱伝導方程式が得られる。

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left( k \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( k \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( k \frac{\partial T}{\partial z} \right) + \dot{q}_v \quad \dots\dots\dots(2-7)$$

熱伝導率kが一定とみなせる場合は、さらに次のように簡略化される。

$$\frac{\partial T}{\partial t} = a \left( \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) + \frac{\dot{q}_v}{\rho c} \quad \dots\dots\dots(2-8)$$

ここで、aは温度伝導率あるいは熱拡散率 (m<sup>2</sup>/s) とよばれる物性値であり、次式で定義される。

$$a = \frac{k}{\rho c} \quad \dots\dots\dots(2-9)$$

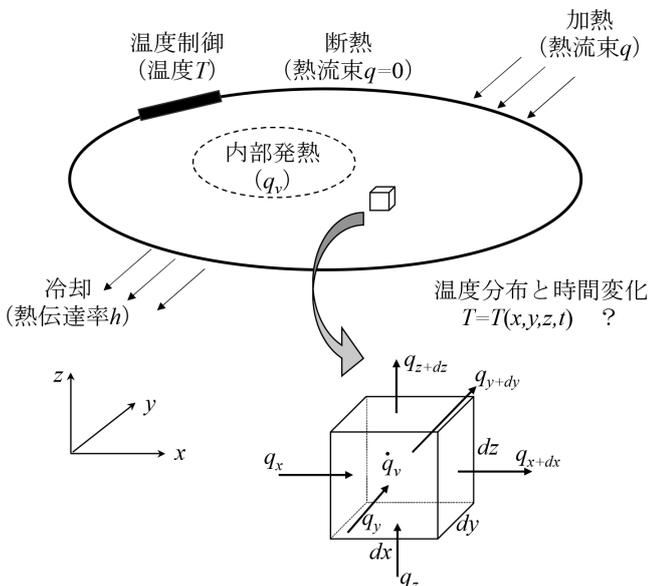


図2-3 物体温度分布・時間変化と熱伝導方程式

このように導出された式 (2-7) あるいは式 (2-8) は、初期条件 (時刻t=0における温度分布) と境界条件が設定されれば、差分法して数値的に解くことができる。境界条件はx, y, z各方向に対して2つ必要であり、前回の講座で解説された3種類がある。第1種境界条件は境界面温度が定められる場合、第2種境界条件は境界面の熱流束が定められる場合 (断熱q=0を含む)、第3種境界条件は境界面での対流熱伝達率と周囲流体温度が定められる場合である。式 (2-7) や式 (2-8) の計算は、様々な商用計算コードやオープンアクセスソフトウェアに組み込まれており、特殊なケースを除けば比較的容易に計算することができる。

## 4 定常熱伝導と熱抵抗

### 4.1 熱抵抗の概念

定常状態とは、温度分布が時間に依存しない状況を指す。産業界や身の回りの伝熱現象は、厳密にはほぼ全てが非定常現象であるが、定常状態と仮定して差し支えが無い (誤差が小さい) ケースも多い。式 (2-8) において、定常状態では左辺が0になり、また内部発熱も無視できる場合は、熱伝導方程式は次式のようになる。

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} = 0 \quad \dots\dots\dots(2-10)$$

以下、この定常状態の熱伝導に関連して、熱抵抗の概念を紹介する。

図2-4左図は有名な電気回路のオームの法則を示している。電位差ΔE (V) は電気抵抗R (Ω) と電流I (A) の積で表される。一方、3つの伝熱様式全てについて、温度差ΔT (K) と伝熱量Q̇ (W) の間には、オームの法則と類似の次式が成り立つ。

$$\Delta T = R \times \dot{Q} \quad \dots\dots\dots(2-11)$$

#### 電気回路のオームの法則との類似性

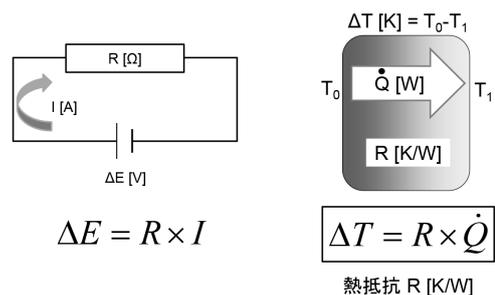


図2-4 熱抵抗の考え方

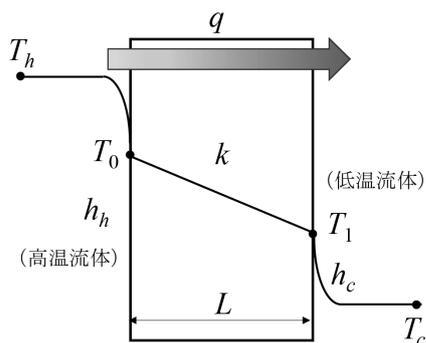


図2-5 熱通過 (固体平板を介した高温流体から低温流体への伝熱)

ここでRは熱抵抗 (K/W) と呼ばれ、伝熱様式により異なる定義になる。図2-1の平板定常熱伝導 (図中破線) の場合、フーリエの法則から次式が得られる。

$$\dot{Q} = Ak \frac{T_0 - T_1}{L} \rightarrow \Delta T = T_0 - T_1 = \frac{L}{Ak} \times \dot{Q} \dots\dots\dots(2-12)$$

ここでAは伝熱面積 (m<sup>2</sup>) である。よって平板熱伝導の熱抵抗は次式となる。

$$R = \frac{L}{Ak} \dots\dots\dots(2-13)$$

また、前回講座で説明された対流伝熱に関しては、ニュートンの冷却法則より熱抵抗が以下のように導かれる。

$$\dot{Q} = Ah(T_w - T_f) \rightarrow \Delta T = T_w - T_f = \frac{1}{Ah} \times \dot{Q} \rightarrow R = \frac{1}{Ah} \dots\dots\dots(2-14)$$

ここで、T<sub>w</sub> は固体表面温度 (K)、T<sub>f</sub> は流体代表温度 (K)、hは熱伝達率 (W/(m<sup>2</sup>·K))、である。

### 4.2 熱通過

紹介した熱抵抗の概念は、伝熱方向に複数の熱抵抗がつながっている場合に有用なツールとなることが多い。一例として、図2-5に示す状況を考えてよう。厚さがLで熱伝導率がkの板があるのは図2-1と同じであるが、左右表面が流体と接している。左側表面には代表温度T<sub>h</sub> (K) の高温流体が接していて、熱伝達率h<sub>h</sub> (W/(m<sup>2</sup>·K)) で対流伝熱が生じている。一方、右側表面には代表温度T<sub>c</sub> (K) の低温流体が接していて、熱伝達率h<sub>c</sub> (W/(m<sup>2</sup>·K)) で対流伝熱が生じている。全体で捉えれば、固体板を介して高温流体から低温流体へ熱移動が生じている。このような状況は熱通過と呼ばれていて、熱交換器を始めとして産業現場や身の回りに多く見られる。設定として、T<sub>h</sub>、T<sub>c</sub>、h<sub>h</sub>、h<sub>c</sub>、L、kが既知で、熱通過による熱流束qと板左右表面温度T<sub>0</sub>、T<sub>1</sub>の3つの値を求めてみよう。

図2-5の高温流体 (温度T<sub>h</sub>) と低温流体 (温度T<sub>c</sub>) の間には、

3つの熱抵抗が直列につながっているため、トータルの熱抵抗R<sub>t</sub> (K/W) は次式で表される。

$$R_t = \frac{1}{Ah_h} + \frac{L}{Ak} + \frac{1}{Ah_c} = \frac{1}{A} \left( \frac{1}{h_h} + \frac{L}{k} + \frac{1}{h_c} \right) \dots\dots\dots(2-15)$$

1つ目は高温側の対流伝熱熱抵抗、2つ目は平板熱伝導熱抵抗、3つ目は低温側の対流伝熱熱抵抗であり、直列回路の全体の抵抗は個別抵抗の和であることを利用している。この式 (2-15) を式 (2-11) に当てはめると以下の結果を得る。

$$\dot{Q} = \frac{\Delta T}{R_t} = \frac{A(T_h - T_c)}{\frac{1}{h_h} + \frac{L}{k} + \frac{1}{h_c}} \rightarrow q = \frac{\dot{Q}}{A} = \frac{T_h - T_c}{\frac{1}{h_h} + \frac{L}{k} + \frac{1}{h_c}} \dots\dots\dots(2-16)$$

得られた熱流束qより、板左右表面温度T<sub>0</sub>、T<sub>1</sub>は式 (2-14) から計算できる。

さらに具体的事例計算を通じて、熱抵抗の有用性を確認する。高温ガスを内部に有する炉壁の熱通過を考える。実際には耐火材や断熱材が用いられるが、仮定として図2-5の状況と下記条件において計算してみよう。

高温流体温度	T <sub>h</sub> = 1500K
低温流体温度	T <sub>c</sub> = 300K
高温側熱伝達率 (ふく射の効果も含む)	h <sub>h</sub> = 600W/(m <sup>2</sup> ·K)
低温側熱伝達率 (ふく射の効果も含む)	h <sub>c</sub> = 20.0W/(m <sup>2</sup> ·K)
金属平板厚み	L = 30.0mm
金属平板熱伝導率	k = 25.0W/(m·K)

式 (2-15) に当てはめると、全体の熱抵抗は

$$R_t = \frac{1}{A} \left( \frac{1}{h_h} + \frac{L}{k} + \frac{1}{h_c} \right) = \frac{10^{-3}}{A} (1.67 + 1.20 + 50.0) \dots\dots\dots(2-17)$$

$$= \frac{5.29 \times 10^{-2}}{A} \text{ (K/W)}$$

となり、熱通過による熱流束は式 (2-16) より

$$q = \frac{T_h - T_c}{\frac{1}{h_h} + \frac{L}{k} + \frac{1}{h_c}} = 2.27 \times 10^4 \text{ (W/m}^2\text{)} \dots\dots\dots(2-18)$$

を得る。式 (2-17) 中の熱抵抗内訳を見ると、低温側対流伝熱熱抵抗 (1/h<sub>c</sub> = 0.05m<sup>2</sup>·K/W) が支配的であり、その他2つの熱抵抗は小さいことが分かる。このことは、大部分の温度差が生じているのが低温側対流伝熱 (T<sub>1</sub> - T<sub>c</sub> = 1135K) であり、その他の場所の温度差が小さいことが、この熱抵抗評価から分かる。次に、耐火材兼断熱材を金属平板の高温側に設置し、熱通過熱流束を式 (2-18) で得られた値の1/10に低減させる熱設計を考える。耐火材兼断熱材の熱伝導率がk<sub>d</sub> = 1.40W/(m·K) である時、必要な厚さL<sub>d</sub> (m) を求めよう。耐火材兼断熱

材の熱伝導熱抵抗が1つ増えるため、熱通過熱流束の式は、目標熱流束値  $2.27 \times 10^3 \text{ W/m}^2$  を用いて

$$q = \frac{T_h - T_c}{\frac{1}{h_h} + \frac{L_d}{k_d} + \frac{L}{k} + \frac{1}{h_c}} = 2.27 \times 10^3 \left( \text{W / m}^2 \right) \dots\dots\dots(2-19)$$

と表される。この式より、 $L_d = 0.666\text{m}$  が計算できる。この条件下では、耐火材兼断熱材の熱伝導熱抵抗値は  $L_d/k_d = 0.476\text{m}^2 \cdot \text{K/W}$  であり、式 (2-17) に示された3つの熱抵抗値より1桁以上値が大きい。つまり、大部分の温度差が生じるのは耐火材兼断熱材の両端に変わり、低温対流伝熱の温度差は低下 ( $T_1 - T_c = 113.5\text{K}$ ) する。

## 5 非定常熱伝導

### 5.1 物体内温度分布とビオー数

一般的にいえば、熱伝導現象は非定常であり、3.2節で導出した熱伝導方程式 (式 (2-7) や (2-8)) を解くことで、温度分布の時間変化を評価できる。ここでは、実用上有用な解析的取扱いを紹介する。

一例として、鋼板の冷却過程を考えよう。図2-6に示すように、初期温度  $T_i$  (K) の平板の両面が、代表温度  $T_f$  (K) の流体 ( $T_i > T_f$ ) により熱伝達率  $h$  ( $\text{W/m}^2 \cdot \text{K}$ ) で冷却される。当然のことながら、無限の時間が経過すれば、平板温度は  $T_f$  に漸近する。それまでの非定常過程において、次式で示すビオー数  $Bi$  の大小により、平板内温度分布の様子が異なる。

$$Bi = \frac{hL_c}{k} \dots\dots\dots(2-20)$$

ここで、 $k$  は平板の熱伝導率、 $L_c$  は物体の等価長さ (m) であり、物体の体積  $V$  ( $\text{m}^3$ ) を表面積  $S$  ( $\text{m}^2$ ) で除した値である。厚さに比べて平板表面積が大きい場合、平板の等価長さは厚みの半分となる。図2-6に示すように、 $Bi$  が1より十分小さい場合 (通常、0.1以下) は、平板内部はほぼ一様温度と捉えてよく、前回講座で解説された集中熱容量モデルが適用可能となる。その場合、平板温度  $T$  (K) は時間  $t$  (s) のみの関数で表され、次式で評価できる。

$$T = T_f + (T_i - T_f) \exp\left(-\frac{Sh}{mc} t\right) \dots\dots\dots(2-21)$$

ここで、 $m$  は物体質量 (kg) である。 $Bi$  が小さくなるのは、式 (2-20) から分かるように、自然空冷で熱伝達率  $h$  が小さい場合や平板厚さが薄い場合が該当する。平板内の熱伝導熱抵抗が左右の対流伝熱熱抵抗と比べて無視できるほど小さいとも捉えられる。図2-5の熱通過の具体的事例計算の条件

を用いて  $Bi$  を評価すると、低温側熱伝達率の値を用いれば  $Bi = 20 \times 15 \times 10^{-3} / 25 = 0.012 \ll 0.1$  となり、十分に集中熱容量モデル適用可能と判断できる。一方、沸騰冷却で熱伝達率  $h$  が大きい場合や厚板の場合は  $Bi$  が大きくなり、図2-6の右側図の状況となる。すなわち、非定常冷却が始まると同時に、平板左右表面温度は流体温度  $T_f$  とあまり差が無くなる。対流伝熱熱抵抗が小さく、冷却過程は平板内の熱伝導支配と捉えることができる。

### 5.2 半無限固体1次元非定常熱伝導

$Bi$  が小さくない場合は、基本的には熱伝導方程式を数値的に解くことになるが、伝熱が1次元 (1方向) のみで固体内の内部発熱が無い場合には、以下に紹介する解析解が得られ、実用上有用である。式 (2-8) の熱伝導方程式において、内部発熱項を無視し1次元 ( $x$ 座標方向のみ) とすると次式を得る。

$$\frac{\partial T}{\partial t} = a \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \dots\dots\dots(2-22)$$

初期条件は、 $t = 0$  において  $T = T_i$  とする。今、平板の厚さが無限に大きい場合を考えると、境界面  $x = 0$  から無限に離れた場所の境界条件は初期温度  $T_i$  で一定として与えられる。境界面  $x = 0$  の境界条件として、3.2で説明した3種類の境界条件の内、第1種境界条件 ( $x = 0$  において  $T = T_0$ ) を与えてみよう。この場合、式 (2-22) の解析解が次式で与えられる。

$$T = T_i + (T_0 - T_i) \left\{ 1 - \text{erf}\left(\frac{x}{2\sqrt{at}}\right) \right\} \dots\dots\dots(2-23)$$

ここで、関数  $\text{erf}(y)$  は誤差関数である。誤差関数はExcelの組み込み関数でもあり、式 (2-23) を用いれば固体内温度分布の時間変化や任意の位置の熱流束時間変化が容易に評価で

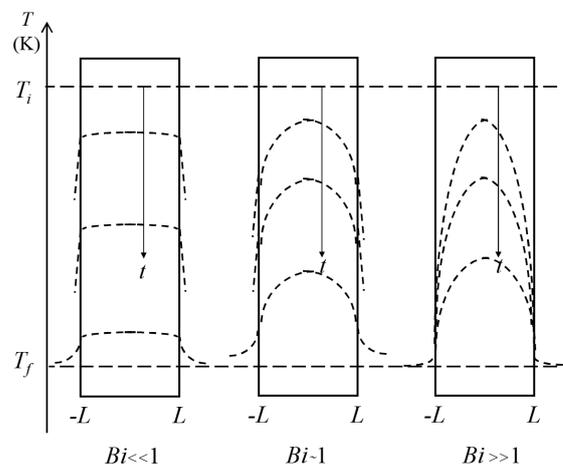


図2-6 非定常熱伝導時の平板内温度分布とビオー数の関係

表2-2 2つの半無限固体接触時の界面温度

物質	密度 $\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	比熱 $c$ (J/(kg·K))	熱伝導率 $k$ (W/(m·K))	界面温度 $T_s$ (K)
ステンレス鋼(SUS304)	7640	644	25.7	---
SKD11	7800	461	26.1	676
水	996	4181	0.613	913
空気	1.17	1007	0.0264	999

き、有用である。第2種境界条件（断熱境界を含む熱流束指定）や第3種境界条件（熱伝達率と流体代表温度指定）の場合も解析解が得られている<sup>1)</sup>。現実的に半無限固体などあり得ないのでは?との疑問もわくが、有限な厚さの平板であっても、初期状態からの経過時間が短ければ半無限固体と扱ってよく、式(2-23)に代表される解析解は有用となるケースも多い。

1つの応用例として、2つの半無限固体が接触した時の界面温度を考えてみよう。高温鋼板が圧延ロール表面と接触する場合や、高温鋼板を水冷する場合など、初期温度が異なる2つの物体が接触する状況は多く見られる。物体1と物体2が接触すると、その接触界面温度  $T_s$  (K) は、式(2-23)を用いた解析の結果、次式で表される<sup>1)</sup>。

$$T_s = \frac{T_{1,i} + \beta T_{2,i}}{1 + \beta}, \quad \beta = \sqrt{\frac{\rho_2 c_2 k_2}{\rho_1 c_1 k_1}} \dots\dots\dots(2-24)$$

ここで、 $T_{1,i}$ と $T_{2,i}$ はそれぞれ接触前の物体1と2の初期温度(K)、密度 $\rho$ と比熱 $c$ と熱伝導率 $k$ の添え字は物体1または2の値であることを示す。 $\beta$ は熱慣性比と呼ばれ、接触界面温度 $T_s$ は時間によらず一定値となり、それぞれの初期温度と熱慣性比で定まる。具体例で計算してみよう。物体1として初期温度 $T_{1,i} = 1000\text{K}$ のステンレス鋼SUS304を設定し、物体2として初期温度 $T_{2,i} = 300\text{K}$ のSKD11、水、空気の3通りで接触界面温度を計算すると表2-2の結果となる。

初期温度が同じでも、熱慣性比が異なると接触界面温度も大きく変化することが分かる。固体と固体の接触の場合は、現実的な問題として接触熱抵抗の評価が重要となるが、詳細は専門書<sup>2)</sup>を参照されたい。また、熱伝導方程式のその他の解析解については、古典的な名著<sup>5)</sup>に多くの事例が紹介されている。

**記号表**

- $a (=k/\rho c)$  : 熱拡散率または温度伝導率 (m<sup>2</sup>/s)
- $A$  : 伝熱面積 (m<sup>2</sup>)
- $Bi (=hL_c/k)$  : ビオー数 (--)
- $c$  : 比熱 (J / (kg·K))
- $h$  : 熱伝達率 (W / (m<sup>2</sup>·K))
- $k$  : 熱伝導率 (W / (m·K))
- $L$  : 寸法 (m)
- $L_c (=体積 / 表面積)$  : 等価長さ (m)
- $m$  : 質量 (kg)
- $q$  : 熱流束 (W/m<sup>2</sup>)
- $\dot{q}_v$  : 単位体積単位時間あたりの内部発熱量 (W/m<sup>3</sup>)
- $\dot{Q}$  : 伝熱量 (W)
- $R$  : 熱抵抗 (K/W)
- $t$  : 時刻 (s)
- $T$  : 温度 (K, °C)
- $x, y, z$  : 座標 (m)

**ギリシャ文字**

- $\beta$  : 熱慣性比 (式(2-24)で定義)
- $\rho$  : 密度 (kg/m<sup>3</sup>)
- $\Delta T$  : 温度差 (K)

**参考文献**

- 1) JSMEテキストシリーズ「伝熱工学」, 日本機械学会, (2003).
- 2) 伝熱工学資料 改訂第5版, 日本機械学会, (2009).
- 3) 新編熱物性ハンドブック, 日本熱物性学会編, (2008).
- 4) 庄司正弘: 伝熱工学, 東京大学出版会, (1995).
- 5) H.S.Carslaw and J.C.Jaeger: Conduction of Heat in Solids, Oxford Science Publications, (1959).

(2021年10月18日受付)