

vol. 2008-4

Mech D & A News

Mechanical Design & Analysis Co.

December 2008



山梨・山中湖, 2008年12月

【特集】熱伝導解析における諸問題

その1 熱荷重問題と伝熱工学

FEM Consulting Services for Engineering Practice
Find Innovation in Tradition 2008-2019

【1】 諸派としての伝熱工学

伝熱工学は経験知に属する学問分野である。同じ機械工学とはいえ、材料力学や機械力学のように、みずから境界をはっきりさせることによって見通しの良さを維持してきたような学問体系とは明らかに異なる。今日、境界条件の明確な問題については、かなり難しい問題も解けるようになってきた。しかし伝熱工学のように、不明瞭な境界条件そのものを追ってきた学問の体系では、点を線で結ぶような実験の成果は多数あるものの、特にシミュレーションという観点からはそれを一枚の画にすることができないままにある。

一方、境界を区切って内部の明瞭性を追ってきた材料力学のような体系では、その見通しの良さのゆえに教育としての必要性はますます高くなるにもかかわらず、研究としての主要な田地は耕し尽くされたかのように見える。生体工学に代表される新しい分野はその耕地を拡大する努力であるし、またマルチフィジックスのような概念は旧来の耕地を区画整理して新たな統合をめざす試みである。

機械工学の諸派はいまそれぞれに解決の困難な課題を抱えているが、その本質的な問題点は、真値を見出すということよりも真値がないことを前提に、あらゆる検討を見直さなければならないという一点に尽きる。旧来の学問の伝統は真理が一つであると説き、それを聞き流すことは誰にも許されることではないが、同時に、体系化を強く拒むものが真理の一面を構成しているということをおれわれは気付かされつつある。これは近代の科学がおれわれにもたらした最も健全な精神であるといつてよい。

点と線によって描かれた従来の知見を真理の既得権とし、それを骨格として数値シミュレーションによるぼう大な結果を点描してゆけば、緊張感を損なうことなく真理に肉薄できるはずである。故野口裕久教授は、「量によって質を強化する」と遺された。今後、数回にわたり伝熱工学における諸問題について解説する。

【2】 熱荷重問題の難しさ

温度変化が構造物に与えられる問題は熱荷重問題と総称されるが、一般にその手順は以下のようなステップによって構成される。

- ① 初期温度と雰囲気との把握、熱源の特定。
- ② 温度の空間的な分布と、その時間的な変化の評価。
- ③ 温度変化にともなう材料の変化、また境界条件の変化が無視できないのであれば、その配慮。
- ④ 破壊などの強度に対する評価、および機能に対する評価。熱応力はその代表的な評価量である。

伝熱工学は、このうち①～③をカバーする工学の分野である。FEMによる伝熱解析(熱伝導解析)は、主に②のステップを実行するためのツールである。また熱応力解析は、その結果を利用して④のステップを行うための手段である。

熱荷重問題を運用の側面から考えたとき、まず注意しなければならないのは、熱荷重が必ずやってくる荷重であるということである。われわれが住む世界は、あらゆるところ温度の勾配によって満たされている。したがって、温度が時間的にも空間的にも一様に保たれた恒温室のような環境に置かない限り、いかなる構造物も熱荷重から逃れることはできない。熱荷重による応力を熱応力と称する。熱応力は熱膨張によるひずみが境界条件などによって拘束されたことによって発生する応力であるので、一般的には変位制御型の応力である。変位制御型の応力を二次応力という。

破壊の形態を考えたとき、熱応力は熱膨張ひずみが変形によって開放されてしまえばそれで終わりであるので、熱応力単独によって目を奪われるような変形をともなう破壊をもたらすことはない。危惧しなければならないのは、温度によって材料の特性そのものが変化し、低温であれば脆性、高温であればクリープなどの損傷要因が顕在化することである。これらの条件の下で機械荷重や温度のサイクルが加わると疲労による亀裂を生じ、内圧や自重などの熱以外の荷重に耐えることができなくなり、致命的な崩壊をもたらす結果となる。creep という用語は忍び寄るという意味をもち、その損傷の特徴を表している。

また繰り返し疲労でない場合でも、温度によって硬化などの改変を生ずる材料が機能部品に使用されていると、本来の動作要求を満たすことができなくなる。米国の戦時標準船やスペースシャトル・チャレンジャーなどは、これらの要因による最も大規模な事故の例である。昨今の設計では、この種の事故要因はおおよそ克服されてきたが、電子や航空宇宙など裕度の少ない機器では現在でもクリティカルな問題を構成している。

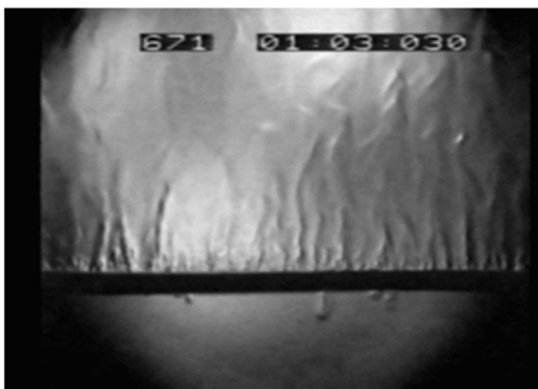
蛇足になるが、必ずやってくる荷重としては熱以外に自重と気象による荷重がある。重力場にある限り、構造物は自重による負荷から逃れることはできないし、また風や波浪なども確率的な現象であるとはいえ日常的な荷重である。これらの大半は力制御型の応力をもたらし、外力と平衡した応力場が内部に達成されるまで容赦なく変形が進むので、材料の強度限界を超えると構造物は一気に崩壊にいたる。このような力制御による応力を一次応力という。

一方、衝撃や地震といった荷重は構造物の極限的な強度を要求するが、(語弊はあるものの) 来るか来ないかわからない荷重である。現代の設計は、単に機器の性能だけでは定まらず、コストに代表される経済性、また安全・環境などの社会性に左右されることは言うまでもない。特に民生機器の場合は衆目にさらされる機会が多いため、設計者とは無縁の場所で評価の少なからぬ部分が定まる。あるいは予算などの多分に経済的な設計者の都合を通すために、ことさらに安全や環境を言わなければならないこともあるに違いない。人の安全性や地球環境のように極限を表す概念は、性能やコストのような相対的・中庸な概念とは異なり、ひとたび発すれば有無を言わせぬ諸刃の剣である。自重や熱のような基礎を棚上げした状態で極限を問う、設計の本質と健全性を損なうことは厳にいましめられなければならない。

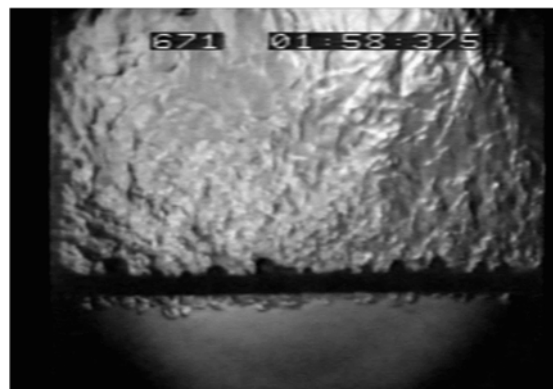
2番目の難しさは、温度が容易に計測可能なスカラー量であることにある。物体は有限の熱慣性をもっており、振動や応力波の伝播などの現象にくらべると温度変化の速度は、通常それほど大きくない。また温度はスカラー量であるために、棒温度計からサーモグラフィのようなものまで、幅広い計測の手段が用意されている。そのため他の物理量に比べて温度の計測は容易であることが多い。しかしながら計測の精度という観点からは、熱の移動が眼に見えないという壁に阻まれ、思うにまかせないのが実情である。雰囲気制御、熱漏洩の防止、熱電対の取り付けといった実務上のテクニックをとまわらないままに安直な実測値が横行し、健全な議論を損なう例が少なくない。伝熱工学を専修した技術者が少ないという事情は、このような傾向への対策を非常に難しくしている。

3番目の難しさは、温度が状態量(場の状態を一意的に決定するための物理量で、過去の履歴や経路に依存しない量)であり、応力やひずみといった力学的な諸量とは独立であるという点にある。言い換えれば、応力評価の場面において、応力側の都合とは無関係に割り込んでくる量である。例えば、「この点の温度を 0°C から 100°C に変更して…」といったような乱暴な設定が許されるため、不合理な条件設定がまかり通る例が少なくない。また解析技術の面からは、材料定数の温度依存性や非弾性解法の安定性(例えば塑性ひずみと熱ひずみの大小関係)に関連して、収束性を悪化させる原因となる。

4番目の難しさは、固体構造物の内部の温度分布を知るためには、雰囲気を構成している流体の流れの状況まで把握しなければならないことにある。構造物と雰囲気との伝熱現象を熱伝達と呼ぶ。また物体の温度が数百°C を超えるような場合は、雰囲気が真空であっても熱放射による伝熱を無視することができない。設計の実務では、構造解析用の FEM を用いて伝熱問題を扱うことが一般的である。この場合、FEM はあくまで構造内部の固体の伝熱(熱伝導)を解くことに限られる。雰囲気との熱のやりとりはきわめて重要であるにもかかわらず、境界条件としてユーザが指定しなければならない。熱伝達率や放射率などの数値データとしてこれを与えることが求められる。Fig.1 は、水中に置かれた白金線を通電加熱し、周囲に生ずる沸騰の様子を可視化した結果である。加熱量の大小によって流れの様相は大きく異なることが



(a) 低熱流束



(b) 高速流束

Fig.1 白金線まわりの沸騰の挙動

(神戸大学・海洋機械工学講座 HP より引用, <http://www.kobe-u.ac.jp/energy/chicago/boilexp.htm>)

わかる。もし白金線の内部の温度分布を解析しようとするとき、境界条件を与えることの難しさはこの写真から理解することができるだろう。

一方、FEM による解析では物体をメッシュに分割して扱う。この取り扱い、メッシュ分割の大きさを多少変えても内部の性質は変わらないことが前提である。言い換えれば、物体内部の代表的なスケールはメッシュサイズによって代表させることができ、その内部の性質は一樣とみなして良いということである。さらに踏み込んだ言い方をすれば、境界条件として与えた雰囲気のスケーリングも、メッシュサイズと同程度であることが期待されているとよい。Fig.1 から明らかかなように、この楽観的な前提がいつも満たされるとは限らない。近年、話題になりつつあるマルチフィジックスという概念は、この例に示されるような界面を接したスケールの異なる複数の物理現象を、一括して扱おうとする試みである。

【3】 経験則としての伝熱工学

物体の内部に温度の分布があるとき、あるいは界面を介して温度の異なる物体や雰囲気と接するとき、温度の高い側から低い側に熱が流れる。この温度差にもとづく熱の移動を伝熱と呼び、伝熱の現象を扱う学問体系を伝熱工学と呼ぶ。

一方、熱を扱う物理学の体系として熱力学がある。一般に熱力学は温度が一樣な平衡状態にある系を対象とし、その平衡状態が準静的に他の平衡状態に移行するときの熱の出入りが議論される。したがって熱力学には時間とか速度の概念は含まれない。これに対して伝熱工学では温度が非平衡であることを前提に、温度の空間的な分布や時間変化、また熱の移動速度が議論される。熱力学との本質的な違いはこの点にある。ただし熱力学は厳密な学問体系であり、伝熱現象も熱力学に律されている。すなわち、いかなる変化過程でも熱力学第1法則（エネルギーの保存則）が成立しており、また熱が高温から低温に流れるのは熱力学第2法則に従っている。

これに対して、伝熱工学は経験則としての色合いが非常に強い。たとえば熱伝導の基礎式であるフーリエの法則がそもそも経験則である⁽¹⁾ということを示し引いても、伝熱工学は他の機械工学系の分野に比べて特殊な感がある。これは単に実用寄りだというのではなく、熱伝達に代表されるような界面の複雑な現象そのものを追う学問体系として伝熱工学が位置づけられてきたからである。国内でもっとも標準的な教科書と思われる甲藤好郎・伝熱概論⁽²⁾では、引用された式の大部分は自身の検討を経た結果であると明記しつつ、Table1 に示すような表を掲載している。

伝熱問題に限らず明瞭性に欠く問題で最も恐れなければならないのは、進路を失い迷宮に入ってしまうことである。この表のような大胆な切り口がどれほどわれわれを迷路から遠ざけ、救いとなるかは計り知れない。ただし最近の電子機器などでは、その寸法の微細さによってこの表の値とはかけ離れた熱伝達率を示すことがあるので注意が必要である。また一般的な注意として、便覧に掲載された式あるいは数値にはミスタイプが少なからずあるので、必ず複数の書籍にあたる慎重さが必要である。

Table 1 熱伝達率の目安⁽²⁾

静止した空気	1 ~ 20	kcal/m ² hr°C (目安としては 10)
流れている空気	10 ~ 250	kcal/m ² hr°C (目安としては 100)
流れている油	50 ~ 1,500	kcal/m ² hr°C
流れている水	250 ~ 5,000	kcal/m ² hr°C (目安としては 1,000)
凝縮(膜状)の水蒸気	5,000 ~ 15,000	kcal/m ² hr°C
沸騰中の水	1,500 ~ 45,000	kcal/m ² hr°C (目安としては 5,000~10,000)
接触熱通過率	100 ~ 1,000	kcal/m ² hr°C

1 kcal/m²hr°C=1.163W/m²K であるので、工学単位で見ても SI 単位で見ても目安として大差はない。

伝熱工学が経験則に多くを頼るということを踏まえて、代表的な参考書を挙げておくことは意味があるだろう。海外を含め、これ以外の図書については、下記 a の教科書の巻末に解説がある。

- 庄司正弘, 伝熱工学, 東京大学出版会, 1995. : 新しい機械工学の立場から書かれた教科書。非常にわかりやすい。
- 甲藤好郎, 伝熱概論, 養賢堂, 1965. : 国内における最も標準的な教科書。広範囲の内容が説明される。
- 伝熱工学資料 (第4版), 日本機械学会, 1986. : 熱伝達式や熱物性値が詳細に示される。FEM 解析には必携。
- 機械工学便覧, 基礎編, α5 熱工学, 日本機械学会, 2006. : 最近に改版された。c.と並ぶ便覧であり必携。

【4】 伝熱の基本形態

熱とは、温度差を駆動力として移動するエネルギーの一形態である。外部から物体にエネルギーを移入し物体の内部エネルギーを増加させる方法としては、温度差以外にも摩擦のような力学的な仕事による方法、あるいはジュール加熱のような電気的な方法がある。しかし伝熱工学においては、このようなエネルギーの変換過程は扱わず、あくまで温度差による熱のかたちでのエネルギーの移動を対象とするのが通常である。

伝熱は、物質を構成する原子、分子、電子の熱運動に基づいて生ずる。その形態としては、以下に示すような熱伝導と熱放射の二つが基本である。慣例的に、固体の表面に温度の異なる流体が接するとき生ずる伝熱を、第3番目の形態として熱伝達と称することがある。本稿ではこの熱伝達も基本形態の一つとして説明するが、熱伝達による熱の移動はあくまで熱伝導であって、熱伝導によって伝えられた熱が流体の運動によって輸送される形態であることを認識しておく必要がある。

4.1. 熱伝導 (Heat Conduction)

分子、原子、電子が保有するエネルギーは温度によって異なる。物体内に温度の違いがあると、その保有エネルギーの違いが隣り合う部分に次々に伝播する。これが熱伝導である。巨視的に見たとき、熱伝導によって伝えられる熱の移動量は、その位置における温度の空間的な勾配に比例することが知られている。これをフーリエの式という。

$$q = -\lambda \left(\frac{\partial T}{\partial n} \right) = -\lambda \text{grad}T \quad \dots (1)$$

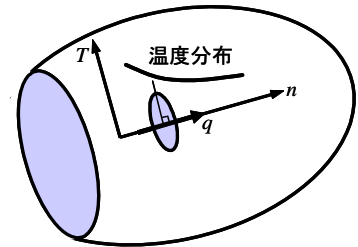


Fig.2 熱伝導とフーリエの式

ここで、 q は単位面積・単位時間あたりの熱の移動量であり熱流束と呼ばれる。初学者への注意としては、熱流束という用語（漢字も含め）の使い方を誤ってはならない。

熱流束は $[\text{J}/\text{sec} \cdot \text{m}^2 = \text{W}/\text{m}^2]$ の単位をもっている。 n は Fig.2 に示すように考えている面に垂直の座標である。 λ は熱伝導率と呼ばれ、材料の熱の伝わり方の良否を表す物性値であり、 $[\text{W}/\text{mK}]$ の単位を持っている。なお(1)式の右辺にマイナスの符号があるのは、温度の正の勾配とは逆の方向、すなわち温度が高い側から低い側に熱が流れることを示している。フーリエの式は経験則であり、連続的な媒体とはいえない希薄気体の場合、あるいは極短時間で高熱流束が作用するような条件下では成立しないと言われている。

4.2. 熱伝達 (Convective Heat Transfer)

固体面と流体の間に生ずる伝熱を熱伝達(Heat Transfer)と呼ぶ。英語では伝熱現象全般をさして Heat Transfer と称するので、対流によることを明確に示すために対流熱伝達(Convective Heat Transfer)と呼ぶことが少なくない。

例として Fig.3 に示すように、温度が T_∞ の空気雰囲気中に、加熱した平板を鉛直に置いた場合を考えよう。熱はまず板からそれに接する空気に熱伝導によって伝えられる。空気は暖められて密度が小さくなり、この結果、加熱面に沿って上昇する空気の流れを生ずる。熱伝導によって板から伝えられた熱は、この上昇流によって運び去られる。

このように、温度の異なる固体面と流体の間に生ずる熱伝導と対流による伝熱の形態を熱伝達と称する。流体の密度は一般に温度の上昇とともに小さくなるので、重力場にある流体が加熱されると Fig.3 に示した例のように浮力による流れを生ずる。このような自然発生的な流れを自然対流と呼ぶ。また、それによる熱の輸送を自然対流熱伝達という。一方、ポンプやファンのような外的な要因によってもともと流れがある場合は、その流れによる熱の輸送を強制対流熱伝達と呼んで区別する。

熱伝達による熱流束は、(2)式によって表す。ここで、 T_w は固体表面の温度、 T_∞ は固体表面から十分に離れた位置における流体の温度である。 T_∞ は流体の巨視的な温度を代表しているので、英語ではバルク温度あるいはシンク温度と称される。また比例定数である h は熱伝達率と呼ばれ $[\text{W}/\text{m}^2\text{K}]$ の単位を持っている。

$$q = h(T_w - T_\infty) \quad \dots (2)$$

熱伝達の現象を微視的に見れば、Fig.3 に示すように、固体表面から有限の距離だけ離れた位置で流体の温度は T_∞ に漸近している。この表面近傍で温度勾配をもった領域を温度境界層と称する。

この温度境界層の厚さは、通常、流れの全体のスケールのなかではごく薄いと言われており、例えば走行中の自動車くらいの速度と寸法の条件下では数 mm 程度の厚さである。

(2)式で表される熱伝達という概念の特徴は、この薄い層において生じている微視的な現象にとらわれず、単純に h という係数を代表的な温度差に乗ずることによって伝熱量を評価しようという（大胆な）考え方である。熱伝達率を Film Coefficient と称したり、汎用 FEM で熱伝達の入力キーワードを Film と称するのは、この薄い層における伝熱現象を指しているためである。

当然、 h の大きさは流体の物性だけでは定まらず、流れの性質に強く依存する。 h の推定には、理論的、実験的さまざまな知見が便覧^{(3),(4)}にまとめられているが、先に示した Table1 は、その大まかな足がかりを与えるものである。

4.3. 熱放射 (Thermal Radiation)

固体や気体塊はその温度に応じて電磁波のかたちでエネルギーを放射ないし吸収する。この結果、温度の異なるこれらの間では熱エネルギーの授受を生じ、これを熱放射と呼ぶ。熱放射は、熱伝導や熱伝達と異なり、媒体のない真空中でも生じる点に特徴がある。魔法瓶のように真空層を設けた構造でも完全な断熱を得ることができないのはこの理由による。

熱放射では、理想的な放射体あるいは吸収体として黒体という概念を考える。黒体は到来するすべての熱放射エネルギーを完全に吸収すると同時に、もっともよく熱放射エネルギーを放射する物体である。概念的には、Fig.4 に示すようなくぼみをもった小孔が黒体に近い。黒体面から放射される熱放射エネルギーの大きさは、ステファン-ボルツマンの式によって与えられる。

$$q_b = \sigma T^4$$

$$\sigma = 5.669 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2\text{K}^2 \quad \dots (3)$$

(3)式において、添字 b は黒体であることを示し、 σ はステファン-ボルツマン定数と呼ばれる物理定数である。また温度 T は絶対温度であることに注意しなければならない。

なお現実の物体面は、面の粗さや酸化皮膜などの表面性状が関与して複雑であるが、工学的に以下に示すような灰色面という概念が用いられる。

$$q = \epsilon q_b = \epsilon \sigma T^4 \quad \dots (4)$$

ここで ϵ は射出率と呼ばれ、0~1 のあいだの数値をとり、理想的な黒体放射に対する比率を表している。 ϵ の値は、材料の種類や表面の性状に依存する。

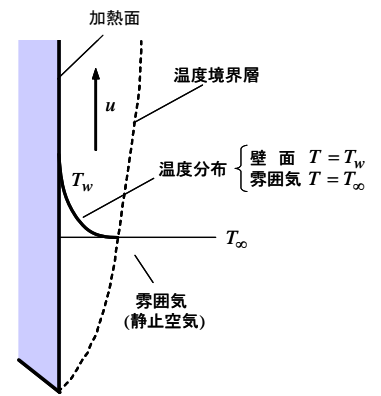


Fig.3 対流と熱伝達
(加熱平板による自然対流熱伝達)

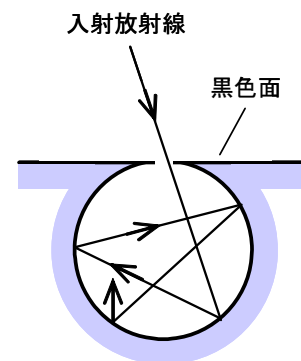


Fig.4 近似的な黒体面

【5】 定常熱伝導問題，熱抵抗と熱通過

次に実用的な伝熱問題を FEM で解析しようとする場合，その足がかりとなる基本的な概念を解説する．まず定常問題から述べる．

5.1. 1次元定常熱伝導と熱抵抗

1次元の定常熱伝導問題として，Fig.5 に示すような両端面の温度が T_1 ， T_2 に保たれた厚さ d ，面積 A の広い平板を考える．平板内部の温度勾配はフーリエの式から明らかなように直線的である．したがって平板を定常的に通過している熱量 Q は，端面の温度差 $\Delta T = |T_2 - T_1|$ に比例する．また R は熱抵抗と呼ばれ，伝熱の係数の逆数である．

$$Q = A\lambda \frac{\Delta T}{d} = \frac{\Delta T}{R}$$

$$R = \frac{d}{A\lambda} \quad \dots (5)$$

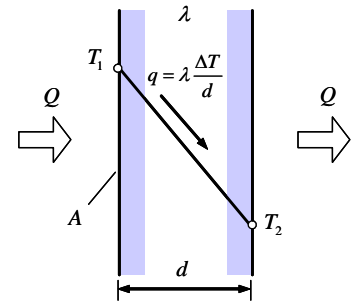


Fig.5 1次元定常熱伝導問題

この問題を Fig.6 に示すような多層平板に拡張してみよう．両端面の温度が T_a ， T_b に保たれた多層体の1次元の定常熱伝導問題を考える．内部の界面の温度を T_{12} ， T_{23} とし，それぞれの平板に単層板と同じくフーリエの法則を適用すると，

$$T_a - T_{12} = \left(\frac{Q}{A}\right) \frac{d_1}{\lambda_1} \quad T_{12} - T_{23} = \left(\frac{Q}{A}\right) \frac{d_2}{\lambda_2}$$

$$T_{23} - T_b = \left(\frac{Q}{A}\right) \frac{d_3}{\lambda_3}$$

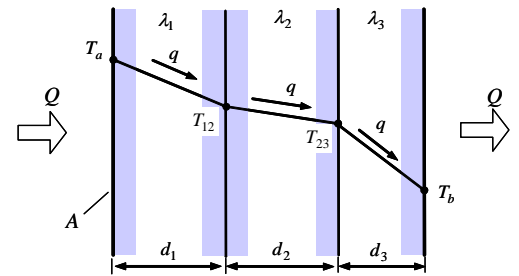


Fig.6 多層平板の1次元定常熱伝導問題

定常の条件下ではどの層においても熱量 Q は同じ，すなわち連続であることに注意しなければならない．そこで上式の辺々を足し合わせると T_{12} ， T_{23} を消去することができる．

$$T_a - T_b = \left(\frac{Q}{A}\right) \left(\frac{d_1}{\lambda_1} + \frac{d_2}{\lambda_2} + \frac{d_3}{\lambda_3}\right)$$

すなわち，この多層板の全熱抵抗は以下のようになり，直列にバネを配置したモデルに相当する．

$$R_t = \frac{1}{A} \left(\frac{d_1}{\lambda_1} + \frac{d_2}{\lambda_2} + \frac{d_3}{\lambda_3}\right)$$

一般に， n 層からなる多層板の全熱抵抗は以下のように表される．なお λ_i/d_i は熱伝達率 h と同じ次元をもち，各層に与えられた温度差に対する熱の伝わりやすさを表す量になる．同時に各層において発生する温度落差の大きさは，この値に反比例することに注意しなければならない．

$$R_t = \frac{1}{A} \sum_{i=1}^n \frac{d_i}{\lambda_i} \quad \dots (6)$$

5.2. 熱通過

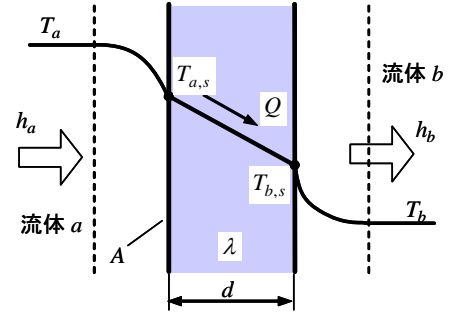
1次元の定常熱伝導の問題に熱伝達を組み合わせる．例えば熱交換器では，伝熱板の外表面は流体に接し熱伝達を生じている．このように熱伝導と熱伝達が共存して伝熱をもたらす場を熱通過と呼ぶ．Fig.7 に示すような，両端面において温

度 T_a , T_b の流体に接する厚さ d , 面積 A の広い平板を考える. 定常的な熱の移動量は,

$$Q = K(T_a - T_b) = \frac{(T_a - T_b)}{R_t} \quad \dots (7)$$

ここで, K を熱通過率, R_t を総括熱抵抗と呼ぶ. K は R_t の逆数であり総括熱コンダクタンスとも呼ばれる. いま表面の熱伝達部分については,

$$Q/A = h_a(T_a - T_{a,s}) \quad Q/A = h_b(T_{b,s} - T_b)$$



また内部の熱伝導部分については,

$$Q/A = \lambda(T_{a,s} - T_{b,s})/d$$

これらから $T_{a,s}$, $T_{b,s}$ を消去すると,

$$\frac{Q}{A} = \frac{T_a - T_b}{\frac{1}{h_a} + \frac{d}{\lambda} + \frac{1}{h_b}}$$

したがって熱通過率 K , 総括熱抵抗 R_t は (8) 式のように表される. また多層平板の場合も同様に (9) 式で表される.

$$\frac{1}{K} = R_t = \frac{1}{A} \left(\frac{1}{h_a} + \frac{d}{\lambda} + \frac{1}{h_b} \right) \quad \dots (8) \quad R_t = \frac{1}{A} \left(\frac{1}{h_a} + \sum_{i=1}^n \frac{d_i}{\lambda_i} + \frac{1}{h_b} \right) \quad \dots (9)$$

以上の概念は, 積層になった構造においてどの部分が全体の温度落差のうちで主要な部分を占めるのかといったポイントをも, 手計算で推測できるので, FEM による解析の下準備としてきわめて有用である.

【6】 おわりに

熱荷重問題の難しさについて述べるとともに, 伝熱工学の基礎を概説した. 後続のニューズレターでは, FEM による熱伝導解析を行う際にポイントとなる項目について, 例題をまじえて解説する.

参考文献

- (1) 庄司正弘, 伝熱工学, 東京大学出版会, 1995.
- (2) 甲藤好郎, 伝熱概論, 養賢堂, 1965.
- (3) 伝熱工学資料 (第4版), 日本機械学会, 1986.
- (4) 機械工学便覧, 基礎編, α5 熱工学, 日本機械学会, 2006.
- (5) 土木学会応用力学委員会, いまさら聞けない計算力学の常識, 丸善, p.191, 2008.
- (6) 機械工学便覧, 基礎編, α3 材料力学, 日本機械学会, p.62 2006.

表紙: ドン・ボスコ社, 祈りの風景, 2008年カレンダー12月より許可を得て転載. 撮影はサレジオ会・関谷義樹司祭による. 明神山・鉄砲木ノ頭からの撮影. 撮影の時期は4月中旬といわれる. なお, 山中湖は天孫降臨に際して瓊々杵命に嫁した姉君である磐長姫を, また富士山は妹君である木花咲耶姫を祭神として共に祀ることによって, 不二の大和, すなわち二つに見えて一つである和合のはたらきを司られる.

株式会社 メカニカルデザイン

〒182-0024 東京都調布市布田 1-40-2 アクシス調布 2 階

TEL 042-482-1539 FAX 042-482-5106

E-mail: comm@mech-da.co.jp http://www.mech-da.co.jp/