2006年12月4,5日 東京 、12月7,8日 名古屋

第28回Mech D&Aセミナー

熱伝導・熱応力解析の実際

2006年12月

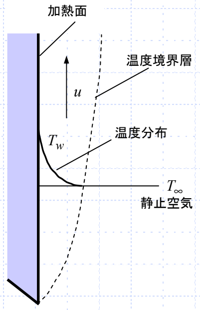
株式会社メカニカルデザイン

熱荷重問題の難しさ

- 温度は容易に計測可能なスカラー量である。
  - 温度領域の上下限、時間追従性の問題はあるが、温度は何らか計測可能である。
  - スカラー量であるため、非接触計測などの手段もとりやすい。
  - この結果、実験的な背景の難しさにもかかわらず、(場合によっては低精度の)実測値が一人歩きしがちである。
- 熱力学的状態量(温度、圧力、比容積)は、力学的状態量(速度、高さ)に対して独立である。
  - 応力解析の中で自由に温度場を与えることができる。換言すれば、応力解析側の都合にかかわらず強引に割り込んでくる。
  - この結果、材料定数の温度依存性や、弾塑性熱応力解析(初期ひずみ法)に関連して、収束性の確保に配慮しなければならない。
  - また、不合理な温度解析条件の設定がまかり通る例が少なくない。
- 熱荷重は必ずやってくる荷重である。
  - 自重と同様に、必ず検討しなければならない荷重である。
  - しかし衝撃応答のような派手さが無いので、予算計画において過小に扱わない注意が必要である。

伝熱の基本形態・熱伝達 p.5

- 温度がT_∞の空気中に加熱した平板を垂直に置いた場合を考える。熱は、まず熱伝導により、加熱面からそれに接する空気に伝えられる。
- 暖められた空気の密度は小さくなり板に沿って上昇流が生じる。この結果、熱伝導によって伝えられた熱は空気の流れによって上方に運ばれる。
- このように、温度の異なる固体と流体の間には、熱伝導と対流（流れ）による熱移動を生ずるが、これを**熱伝達**という。
- 重力場にあって、浮力によって生じた対流による熱伝達を**自然対流熱伝達**と呼ぶ。
- またポンプやファンによって作られた流れ、あるいは移動する物体の周囲の流れによる熱伝達を**強制対流熱伝達**と呼ぶ。



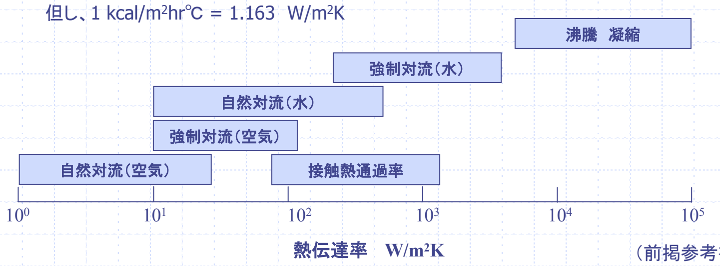
対流と熱伝達（垂直過熱面に沿う自然対流）

伝熱の基本形態・熱伝達 p.5

- 熱伝達率hは、流体の物性値だけでなく、流れの性質に強く依存し、実験的な経験則として与えられるものが大半である。

静止した空気	1～20	kcal/m²hr℃
流れている空気	10～250	kcal/m²hr℃
流れている油	50～1,500	kcal/m²hr℃
流れている水	250～5,000	kcal/m²hr℃
凝縮（膜状）の水蒸気	5,000～15,000	kcal/m²hr℃
沸騰中の水	1,500～45,000	kcal/m²hr℃
接触熱通過率	100～1,000	kcal/m2hr℃

但し、1 kcal/m²hr℃ = 1.163 W/m²K



（前掲参考書1および2）

熱伝導方程式 p.14

■ 熱伝導の問題は、フーリエの法則と熱量保存則によって、完全に記述される。これらを用いて、3次元熱伝導場の方程式を導いてみる。

■ 点(x,y,z) を中心とする微小な検査体積ΔxΔyΔz を考える。微小時間Δt の間に、検査体積の温度がΔT だけ変化するとして熱量のつり合いを考えると、

$$\rho c\Delta x\Delta y\Delta z\frac{\Delta T}{\Delta t} = \left(q_{x-\frac{\Delta x}{2}} - q_{x+\frac{\Delta x}{2}}\right)\Delta y\Delta z + \left(q_{y-\frac{\Delta y}{2}} - q_{y+\frac{\Delta y}{2}}\right)\Delta z\Delta x$$

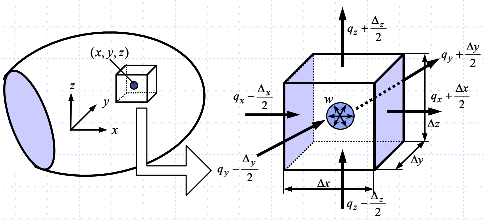
内部エネルギの変化
ρ:密度、 c:比熱

各方向から検査体積に流入する熱量

$$+\left(q_{z-\frac{\Delta z}{2}} - q_{z+\frac{\Delta z}{2}}\right)\Delta x\Delta y + w\Delta x\Delta y\Delta z \qquad (2.1)$$

同上

内部発熱(ジュール熱、化学反応など)
w:単位時間、単位体積あたりの発熱量



微小検査体積と熱伝導

熱伝導方程式 p.14

$$\rho c\Delta x\Delta y\Delta z\frac{\Delta T}{\Delta t} = \left(q_{x-\frac{\Delta x}{2}} - q_{x+\frac{\Delta x}{2}}\right)\Delta y\Delta z + \left(q_{y-\frac{\Delta y}{2}} - q_{y+\frac{\Delta y}{2}}\right)\Delta z\Delta x$$

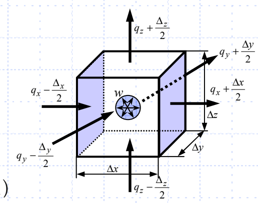
内部エネルギの変化
ρ:密度、 c:比熱

各方向から検査体積に流入する熱量

$$+\left(q_{z-\frac{\Delta z}{2}} - q_{z+\frac{\Delta z}{2}}\right)\Delta x\Delta y + w\Delta x\Delta y\Delta z \qquad (2.1)$$

同上

内部発熱(ジュール熱、化学反応など)
w:単位時間、単位体積あたりの発熱量



■ (2.1)式の右辺第1項にフーリエの式を適用する。λxはx方向の熱伝導率である。

$$q_{x-\frac{\Delta x}{2}} - q_{x+\frac{\Delta x}{2}} = -\left(\lambda_x\frac{\partial T}{\partial x}\right)_{x-\frac{\Delta x}{2}} + \left(\lambda_x\frac{\partial T}{\partial x}\right)_{x+\frac{\Delta x}{2}}$$

■ 右辺の2つの項に点(x,y,z) まわりのテイラー展開を適用すると、

$$-\left(\lambda_x\frac{\partial T}{\partial x}\right)_{x\pm\frac{\Delta x}{2}} = -\left\{\left(\lambda_x\frac{\partial T}{\partial x}\right)_x \pm \frac{\partial}{\partial x}\left(\lambda_x\frac{\partial T}{\partial x}\right)_x\frac{\Delta x}{2} + O\left(\Delta x^2\right)\right\}$$

■ $O(\Delta x2)$は、Δxの2次以上の高次の微小項を表し、これを無視すると、

$$q_{x-\frac{\Delta x}{2}} - q_{x+\frac{\Delta x}{2}} = \frac{\partial}{\partial x}\left(\lambda_x\frac{\partial T}{\partial x}\right)_x\Delta x \qquad (2.2a)$$