

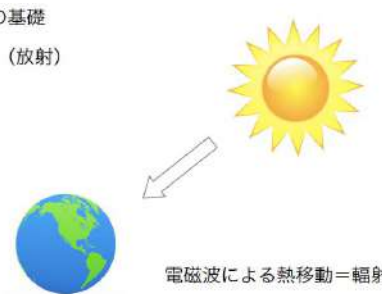
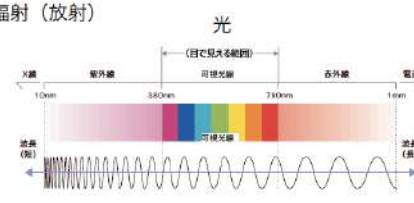


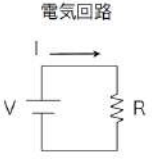
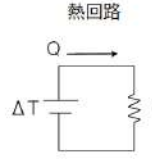
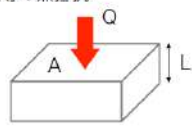

■ A9【パワーモジュールのサーマルマネジメント】 畠山講師

<p>パワーモジュールのサーマルマネジメント</p> <p>富山県立大学 畠山 友行</p>	
<p>講演概要</p> <ul style="list-style-type: none"> ・サーマルマネジメントの概要 ・熱移動の基礎 ・熱抵抗の考え方 ・低熱抵抗化の技術 ・物性および温度の計測手法 ・サーマルマネジメントの最新動向 	
<p>サーマルマネジメントの概要</p> <ul style="list-style-type: none"> ・サーマルマネジメント＝熱設計 <ul style="list-style-type: none"> - 正確な温度の予測 - 熱抵抗低減手法の選定（冷却手法を含む） ・温度予測手法 <ul style="list-style-type: none"> - 実験によるトライアンドエラー - 理論解析→微分方程式など - 熱回路網法（本講演で扱う） - 数値流体力学（CFD：Computational Fluid Dynamics）解析 	
<p>熱移動の基礎</p> <ul style="list-style-type: none"> ・伝熱の三形態（顕熱輸送） <ul style="list-style-type: none"> - 熱伝導 - 対流熱伝達 - 輻射 ・潜熱を伴う熱移動 <ul style="list-style-type: none"> - 沸騰冷却 - 相変化材（PCM：Phase Change Material） 	
<p>熱移動の基礎</p> <p>熱伝導</p>  <p>動かない物体内部の熱移動＝熱伝導</p>	

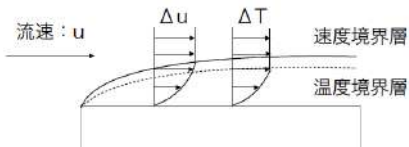
■ A9【パワーモジュールのサーマルマネジメント】 畠山講師

<p>熱移動の基礎</p> <p>対流熱伝達</p> <p>エアコン（強制対流） 湯沸かし（自然対流）</p>  <p>流れを伴う熱移動＝対流熱伝達</p>	
<p>熱移動の基礎</p> <p>輻射（放射）</p>  <p>電磁波による熱移動＝輻射</p>	
<p>熱移動の基礎</p> <p>輻射（放射）</p> <p>光</p>  <p>電磁波</p> <p>http://www.toa.co.jp/otokukan/otolabo/theme2/at3.htm</p>	
<p>熱移動の基礎</p> <ul style="list-style-type: none"> ・単位面積：1 m² ・単位時間：1 s ・熱エネルギー：ジュール [J] ・熱流：単位時間に流れる熱：Q [W] (= J/s) ・熱流束：単位面積あたりの熱流：q [W/m²] ・熱伝導率：物質の熱の伝わりやすさ λ [W/(m·K)] ・熱伝達率：固体と流体の間の熱の移動しやすさ h [W/(m²·K)] 	
<p>熱抵抗の考え方</p> <p>熱回路 ≡ 電気回路</p> <p>電気回路の解析</p> <p>オームの法則：V = IR</p> <p>熱回路の解析</p> <p>ジュールの法則：ΔT = QR</p> <p>ΔT：温度差（電位差に対応） Q：熱流（電流に対応） R：熱抵抗（電気抵抗に対応）</p>	


■ A9【パワーモジュールのサーマルマネジメント】 畠山講師

<p>熱抵抗の考え方</p> <div style="display: flex; justify-content: space-around;"> <div style="text-align: center;"> <p>電気回路</p>  <p>電位差 V ↓ 抵抗 R ↓ 電流 I</p> </div> <div style="text-align: center;"> <p>熱回路</p>  <p>熱流 Q ↓ 熱抵抗 R ↓ 温度差 ΔT</p> </div> </div>	
<p>熱抵抗の考え方</p> <p>熱伝導の熱抵抗</p> <div style="display: flex; align-items: center;">  <div style="margin-left: 20px;"> <p>熱伝導率 λ [W/(m·K)]</p> <p>Q: 熱流 [W] A: 面積 [m²] L: 厚さ (距離) [m]</p> <p>熱抵抗</p> $R = \frac{L}{\lambda A} \quad [K/W]$ <p>* 熱流の流れる向きに注意</p> </div> </div>	
<p>熱抵抗の考え方</p> <p>対流熱伝達の熱抵抗</p> <div style="display: flex; align-items: center;">  <div style="margin-left: 20px;"> <p>熱伝達率 h [W/(m²·K)]</p> <p>Q: 熱流 [W] A: 面積 [m²] * Tw > Tf</p> <p>熱抵抗</p> $R = \frac{1}{hA} \quad [K/W]$ </div> </div>	
<p>熱抵抗の考え方</p> <p>熱伝達率の求め方</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ 無次元数の利用 ・ 流速に関連: レイノルズ数 Re or グラフホス数 Gr ・ 流れと温度を関連付ける: プラントル数 Pr ・ 熱移動に関連: Nu <div style="display: flex; justify-content: space-around; margin-top: 10px;"> <div style="text-align: center;"> <p>強制対流の場合</p> $Nu = f(Re, Pr)$ </div> <div style="text-align: center;"> <p>自然対流の場合</p> $Nu = f(Gr, Pr)$ </div> </div> <p style="text-align: center;">Nuからhを求める</p>	
<p>熱抵抗の考え方</p> <p>レイノルズ数</p> $Re = \frac{uL}{\nu}$ <p>u: 代表速度 [m/s] L: 代表長さ [m] ν: 動粘性係数 [m²/s]</p>	

■ A9【パワーモジュールのサーマルマネジメント】 畠山講師

<p>熱抵抗の考え方</p> <p>レイノルズ数</p> $Re = \frac{uL}{\nu}$ $Re = \frac{\text{慣性力}}{\text{粘性力}} = \frac{\text{外力(乱そうとする力)}}{\text{外乱に逆らう力}}$ <p>Re : 大 = 乱流 Re : 小 = 層流</p>	
<p>熱抵抗の考え方</p> <p>グラスホフ数</p> $Gr = \frac{l^3 g \beta \Delta T}{\nu^2}$ <p>l : 代表長さ [m] g : 重力加速度 [m/s²] β : 体膨張係数 [1/K] ΔT : 固体と流体の温度差 [K] ν : 動粘性係数 [m²/s]</p>	
<p>熱抵抗の考え方</p> <p>グラスホフ数</p> $Gr = \frac{l^3 g \beta \Delta T}{\nu^2}$ <p>物理的意味合いはReと同じ</p> <p>Gr : 大 = 乱流 Gr : 小 = 層流</p>	
<p>熱抵抗の考え方</p> <p>プラントル数</p> $Pr = \frac{\nu}{a} = \frac{\mu c_p}{\lambda}$ $a = \frac{\lambda}{c_p \rho} \quad \nu = \frac{\mu}{\rho}$ <p>a : 熱拡散率 c_p : 比熱 [J/(kg·K)] ρ : 密度 [kg/m³] μ : 粘性係数 [Pa·s] *物性値のみで決まる</p>	
<p>熱抵抗の考え方</p> <p>プラントル数</p> $Pr = \frac{\nu}{a} = \frac{\mu c_p}{\lambda}$ 	

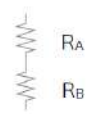
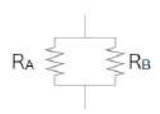

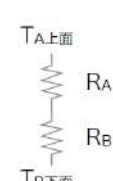

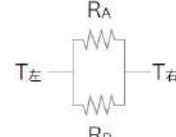


■ A9【パワーモジュールのサーマルマネジメント】 畠山講師

<p>熱抵抗の考え方</p> <p>プラントル数</p> $Pr = \frac{\nu}{\alpha} = \frac{\mu c_p}{\lambda}$ $Pr = \frac{\text{速度境界層厚さ}}{\text{温度境界層厚さ}}$ <p>流れと熱を関連付ける</p>	
<p>熱抵抗の考え方</p> <p>ヌセルト数</p> $Nu = \frac{hL}{\lambda}$ <p>h: 熱伝達率 [W/(m²·K)] L: 代表長さ [m] λ: 流体の熱伝導率 [W/(m·K)]</p>	
<p>熱抵抗の考え方</p> <p>ヌセルト数</p> $Nu = \frac{hL}{\lambda}$ $Nu = \frac{\text{熱伝達}}{\text{熱伝導}} = \frac{\text{流動流体への熱伝達}}{\text{静止流体中の熱伝達}}$ <p>Nu: 大 = 熱伝達支配 Nu: 小 = 熱伝導支配</p>	
<p>熱抵抗の考え方</p> <p>ヌセルト数</p> $Nu = \frac{hL}{\lambda}$ <p>熱伝達の大きさは、 ・熱伝達率のみ ・ヌセルト数 のいずれかで表現される</p>	
<p>熱抵抗の考え方</p> <p>Nuを求める経験式</p> <p>強制対流の場合</p> <p>流速: v</p>  <p>代表長さ: L</p> <p>Re < 3 × 10⁵の条件で</p> $Nu = 0.664 Pr^{1/3} \cdot Re^{1/2}$	

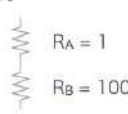
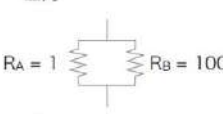
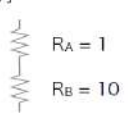
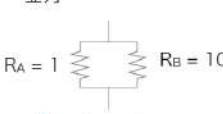
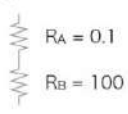
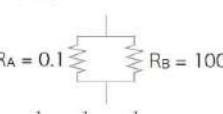

■ A9【パワーモジュールのサーマルマネジメント】 畠山講師

<p>熱抵抗の考え方</p> <p>Nuを求める経験式</p> <p>自然対流の場合</p> <p>$10^5 < Gr \cdot Pr < 10^9$の条件で</p> $Nu = D (Gr \cdot Pr)^{0.25}$ <p>D = 0.56 D = 0.54 D = 0.27</p>	
<p>熱抵抗の考え方</p> <p>例題1</p> <p>1辺10cmの平板上を流速$v = 1 \text{ m/s}$の空気が強制対流で流れている。平板と空気間の熱伝達率はいくつか?</p> <p>空気の物性値</p> <p>動粘度 : $1.535 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$ 熱伝導率 : $2.57 \times 10^{-2} \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ 密度 : $1.12 \text{ kg}/\text{m}^3$ 比熱 : $1.00 \times 10^3 \text{ J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$</p>	
<p>熱抵抗の考え方</p> <p>例題2</p> <p>1辺30 cmの垂直に置かれた板が自然対流で冷却され、温度が$70 \text{ }^\circ\text{C}$になっている。板表面の熱伝達率を求めよ。外気温は$20 \text{ }^\circ\text{C}$とし、重力加速度は$9.81 \text{ m}/\text{s}^2$とする。</p> <p>空気の物性値</p> <p>体膨張係数 : $3.14 \times 10^{-3} \text{ 1}/\text{K}$ その他は、先の問と同じ値</p>	
<p>熱抵抗の考え方</p> <p>輻射の熱抵抗</p> <p>放射率 ϵ [-] ステファン・ボルツマン定数 $\sigma = 5.67 \times 10^{-8} \text{ [W}/(\text{m}^2\cdot\text{K}^4)]$</p> <p>$T_w$: 物体表面温度 [K] T_{air} : 外気温度 [K]</p> <p>熱抵抗</p> $R = \frac{1}{\epsilon A \sigma (T_w^2 + T_{air}^2) (T_w + T_{air})} \text{ [K/W]}$	
<p>熱抵抗の考え方</p> <p>輻射の熱抵抗</p> <p>物体表面温度と外気温の差があまりないとき $T_w \approx T_{air} \approx (T_w + T_{air})/2 \approx T_m$ として</p> <p>熱抵抗</p> $R = \frac{1}{4\epsilon A \sigma T_m^3} \text{ [K/W]}$ <p>*輻射の熱抵抗は必ずケルビン単位で計算する</p>	

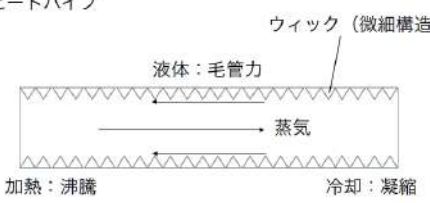

■ A9【パワーモジュールのサーマルマネジメント】 畠山講師

<p>熱抵抗の考え方</p> <p>参考書</p> <ul style="list-style-type: none"> ・伝熱工学の基礎 <ul style="list-style-type: none"> - 一色、北山「伝熱工学」森北出版 - 「伝熱工学 (JSMEテキストシリーズ)」日本機械学会 ・Nuの式など実用的な式 <ul style="list-style-type: none"> - 「伝熱工学資料 改定第5版」日本機械学会 	
<p>熱抵抗の考え方</p> <p>熱抵抗の接続 (熱回路)</p> <p>電気回路と同じように抵抗を接続 →直列、並列の接続</p> <div style="display: flex; justify-content: space-around; align-items: center;"> <div style="text-align: center;">  <p>直列</p> $R = R_A + R_B$ </div> <div style="text-align: center;">  <p>並列</p> $\frac{1}{R} = \frac{1}{R_A} + \frac{1}{R_B}$ </div> </div>	
<p>熱抵抗の考え方</p> <p>熱抵抗の接続 (熱回路)</p> <p>直列接続の例</p> <div style="display: flex; align-items: center; justify-content: center;"> <div style="text-align: center; margin-right: 20px;">  </div> <div style="text-align: center;">  </div> </div>	
<p>熱抵抗の考え方</p> <p>熱抵抗の接続 (熱回路)</p> <p>並列接続の例</p> <div style="display: flex; align-items: center; justify-content: center;"> <div style="text-align: center; margin-right: 20px;">  </div> <div style="text-align: center;">  </div> </div>	
<p>熱抵抗の考え方</p> <p>熱抵抗の接続 (熱回路)</p> <p>並列接続の例</p> <div style="display: flex; align-items: center; justify-content: center;"> <div style="text-align: center; margin-right: 20px;">  </div> <div style="text-align: center;">  </div> </div>	

■ A9【パワーモジュールのサーマルマネジメント】 畠山講師

<p>熱抵抗の考え方</p> <p>例題3 1辺3 cm x 3 cm、厚さ1.5 mmの物体の底面から3 Wの発熱が生じている。物体の上面が自然対流で冷却されているとき、物体底面の温度は何度になるか？ただし、物体上面以外は断熱とする。</p> <p>物体の熱伝導率 : 1 W/(m·K) 自然対流の熱伝達率: 10 W/(m²·K) 外気温 : 25 °C</p>	
<p>低熱抵抗化の技術</p> <p>熱抵抗低減のポイント</p> <p>直列</p>  $R = R_A + R_B$ $R = 1 + 100 = 101$ <p>並列</p>  $\frac{1}{R} = \frac{1}{R_A} + \frac{1}{R_B}$ $R = \frac{1}{\frac{1}{1} + \frac{1}{100}} = 0.99$	
<p>低熱抵抗化の技術</p> <p>熱抵抗低減のポイント</p> <p>直列</p>  $R = R_A + R_B$ $R = 1 + 10 = 11$ <p>並列</p>  $\frac{1}{R} = \frac{1}{R_A} + \frac{1}{R_B}$ $R = \frac{1}{\frac{1}{1} + \frac{1}{10}} = 0.91$	
<p>低熱抵抗化の技術</p> <p>熱抵抗低減のポイント</p> <p>直列</p>  $R = R_A + R_B$ $R = 0.1 + 100 = 100.1$ <p>並列</p>  $\frac{1}{R} = \frac{1}{R_A} + \frac{1}{R_B}$ $R = \frac{1}{\frac{1}{0.1} + \frac{1}{100}} = 0.10$	
<p>低熱抵抗化の技術</p> <p>熱抵抗低減のポイント (全熱抵抗が直列の場合)</p>  <p>*TIM: Thermal Interface Material</p> <p>大きな熱抵抗を小さくする (冷却性能向上が最優先ではない)</p>	

■ A9【パワーモジュールのサーマルマネジメント】 畠山講師

<p>低熱抵抗化の技術（一般論）</p> <p>熱伝導に関わるもの</p> <ul style="list-style-type: none"> ・材料の高熱伝導化 ・高熱伝導性材料への一部置き換え <ul style="list-style-type: none"> - TIMへのフィラー混入 - 樹脂基板への金属材料の導入（サーマルピアなど） ・伝熱面積の増大（熱拡散板） ・伝熱距離の縮小 ・接触熱抵抗の低減 <p>熱抵抗 $R = \frac{L}{\lambda A}$</p>	
<p>低熱抵抗化の技術（一般論）</p> <p>対流熱伝達に関わるもの</p> <ul style="list-style-type: none"> ・放熱面積の増大 <ul style="list-style-type: none"> - ヒートシンクの導入 ・流体の流速の増大 <p>熱抵抗 $R = \frac{1}{hA}$</p> <p>輻射に関わるもの</p> <ul style="list-style-type: none"> ・放熱面積の増大 ・放射率の増大 <ul style="list-style-type: none"> - 放射塗料の塗布 - 黒色アルマイト処理 <p>熱抵抗 $R = \frac{1}{4\epsilon A\sigma T_m^3}$</p>	
<p>低熱抵抗化の技術（具体例）</p> <p>放熱面積を上げる方法</p> <p>グラファイトシートでの熱拡散 →広い放熱面積で外気へ放熱</p> <p>ヒートパイプでの熱輸送 →広い放熱面積で外気へ放熱</p> <p>ペーパーチャンバでの熱拡散 →広い放熱面積で外気へ放熱</p>	
<p>低熱抵抗化の技術</p> <p>ヒートパイプ</p>  <p>近年は1mm以下の厚さのものもある</p>	
<p>低熱抵抗化の技術</p> <p>ペーパーチャンバ</p>  <p>面内方向に均一な熱拡散を促す板</p>	

■ A9【パワーモジュールのサーマルマネジメント】 畠山講師

<p>スマートフォンの冷却</p> <ul style="list-style-type: none"> 0.3mm厚のアルミシート (100 mm x 65 mm) をベース 0.1 mm厚のグラファイトシートで熱拡散 →40°Cから80°C程度までの温度分布 0.7 mm厚のヒートパイプ (4.5 mm x 110 mm x 3) →60°Cから70°C程度までの温度分布 →よりフラットな温度分布 	
<p>低熱抵抗化の技術</p> <p>以上の技術の組み合わせで、熱抵抗を低減する →効果とコストのトレードオフ →スペースと取りうる手段の関係</p>	
<p>物性および温度の計測手法</p> <p>熱電対を用いた温度計測</p> <ul style="list-style-type: none"> なるべく広い面積で接触させる 接触面と熱電対の間に介在物を挟まない 多数点の計測にはヒートシンク効果に注意 <p>誤差の例</p>  <p>10°C程度の差</p> <p>点接触、介在物あり 線接触、介在物なし</p>	
<p>物性および温度の計測手法</p> <p>サーモグラフィを用いた温度計測</p> <ul style="list-style-type: none"> 計測面の放射率を均一にする 絶対温度を計測することは難しい 相対的な温度の比較には適している 	
<p>物性および温度の計測手法</p> <p>過渡熱抵抗計測を用いた熱抵抗計測</p> <ul style="list-style-type: none"> 一次元的な熱移動の計測は容易 二次元、三次元的な熱の広がりがある場合は注意 構造関数の解釈は適切に 	

■ A9【パワーモジュールのサーマルマネジメント】 畠山講師

<p>物性および温度の計測手法</p> <p>複合材料の熱伝導率の計測</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ 定常法と非定常法で異なる場合がある (フィラー割合が高い場合) ・ 非定常法: レーザフラッシュ法など ・ 一般的に、非定常法の法が高い値が出る <p>熱の流れ</p>  <p>定常法 非定常法</p>	
<p>サーマルマネジメントの最新動向</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ 可能な限りの熱抵抗の低減 ・ 接触熱抵抗低減のため接触面を極力作らない ・ 輻射の効果を高める <p>など</p> <p>具体的な最新の情報は、当日紹介</p>	
<p>情報収集ソース (国内)</p> <p>サーマル特化</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ 日本伝熱シンポジウム (日本伝熱学会)、5月下旬 ・ 熱工学コンファレンス (日本機械学会)、10月頃 <p>実装全般</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ ICEP (エレクトロニクス実装学会、JIEP)、4月下旬 ・ MES (JIEP)、8月下旬 ・ ICSJ (IEEE CPMT)、10月下旬 ・ JIEP春季講演大会 (JIEP)、3月 	
<p>情報収集ソース (海外)</p> <p>サーマルが多め</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ ITTherm (IEEE EPS、米国)、5月下旬から6月上旬 ・ InterPACK (ASME、米国)、8月下旬 <p>実装全般</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ ECTC (IEEE EPS、米国)、5月下旬から6月上旬 ・ IMPACT (TPCA、台湾)、10月下旬 ・ EPTC (IEEE EPS、シンガポール)、12月上旬 	