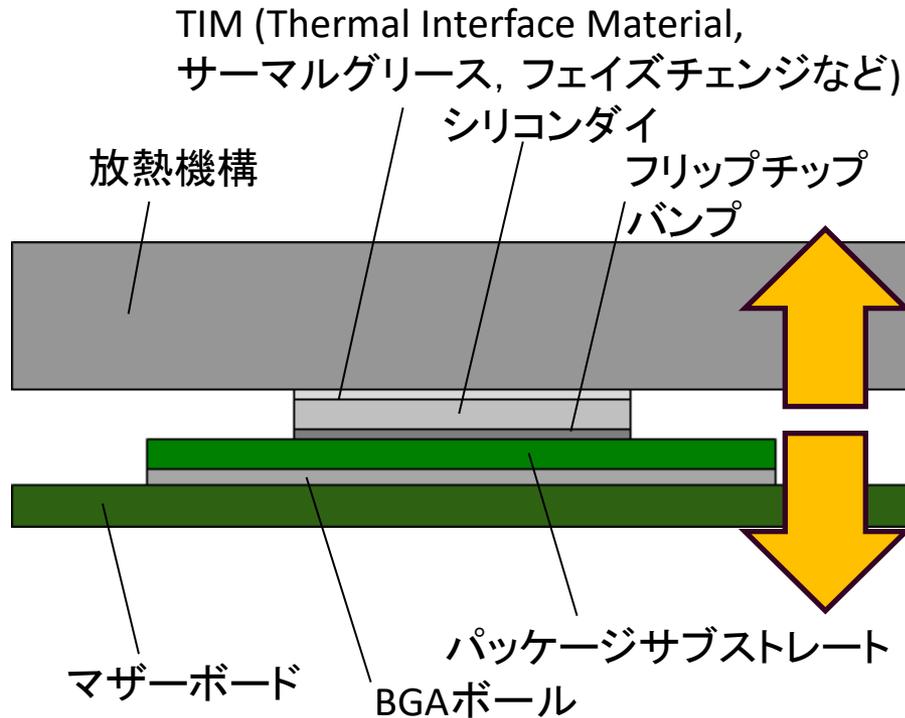


# Modelicaによる熱回路網の構築 とマイクロプロセッサの温度予測

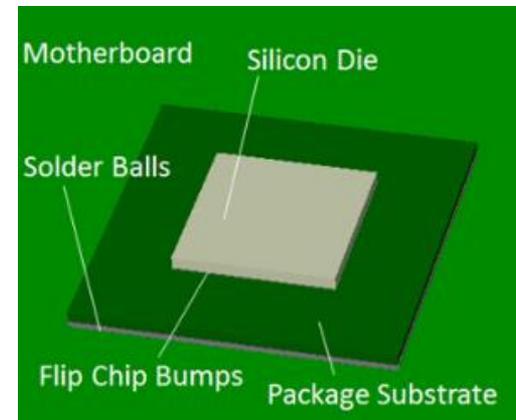
オープンCAE学会  
モデルベースデザイン委員会  
西 剛伺

# マイクロプロセッサの熱管理



伝熱経路

マイクロプロセッサはシリコンダイ回路面で発熱し、その熱はマザーボード側と放熱機構側に分かれて流れる。

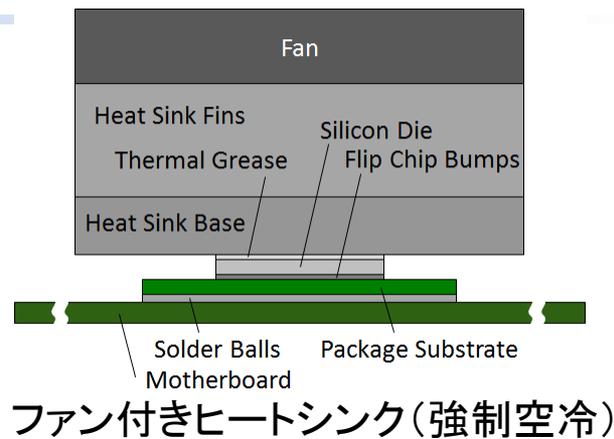
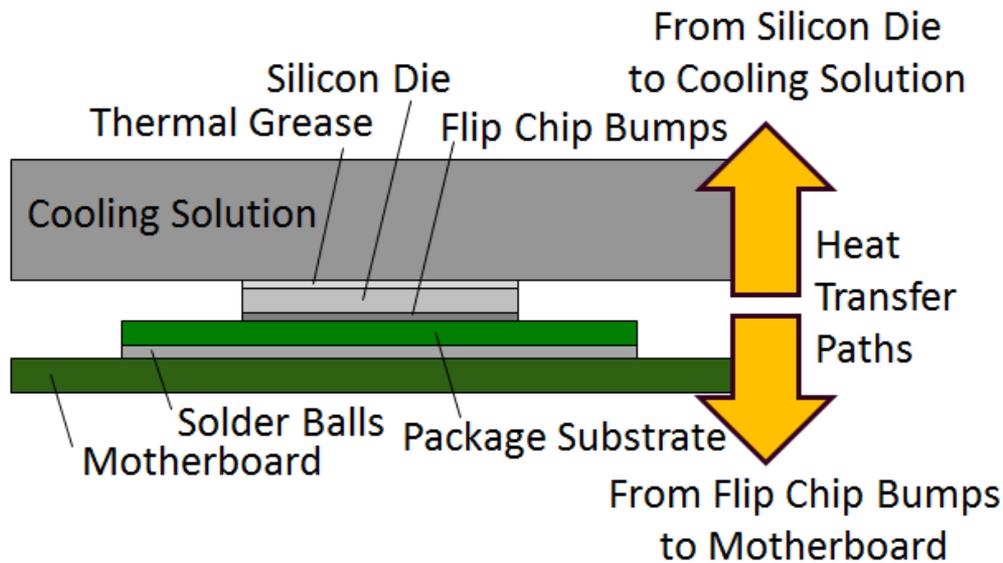


マイクロプロセッサ

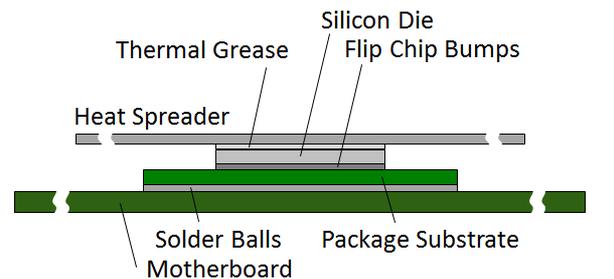
# 小型電子機器筐体内の伝熱経路

対象とするマイクロプロセッサを採用する小型電子機器には、上方と下方の2つの伝熱経路が存在する。典型的な実装として、右図の3種類の放熱機構を採用したシステムが考えられる。

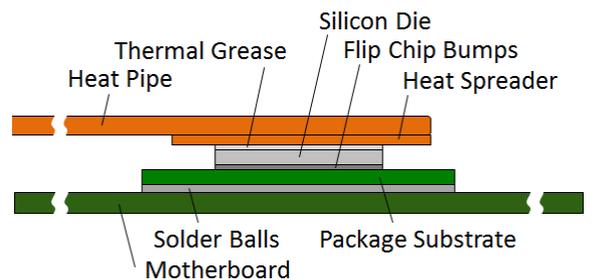
これらの冷却機構を用いた電子機器を想定して、システムをコンパクトかつ高精度な熱回路網で温度予測したい。



ファン付きヒートシンク(強制空冷)



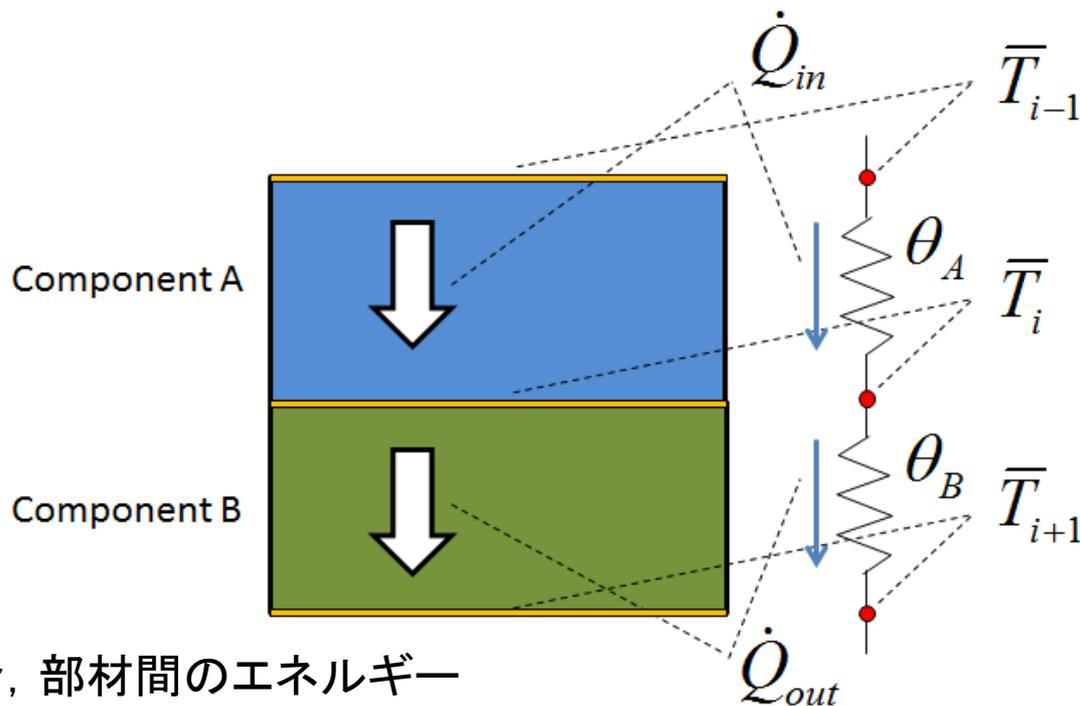
ヒートスプレッド(自然空冷)



リモートヒートエクスチェンジャ (RHE, 強制空冷)

部材の熱抵抗

$$\theta = \frac{l}{kA}$$



部材側面が断熱と仮定できる場合，部材間のエネルギーバランス式は以下ようになる。

$$\begin{aligned} & \dot{Q}_{in} - \dot{Q}_{out} \\ &= \frac{k_A A_A}{l_A} (\bar{T}_{i-1} - \bar{T}_i) - \frac{k_B A_B}{l_B} (\bar{T}_i - \bar{T}_{i+1}) = 0 \end{aligned}$$

ここで，

$$\bar{T}_i = \int_{surface\ i} T dA$$

MSLはサブライブラリ構造になっている。MSLのThermalサブライブラリの下のHeatTransferには、伝熱に関するコンポーネントが多数用意されている。

- Modelica
  - UsersGuide
  - Blocks
  - ComplexBlocks
  - StateGraph
  - Electrical
  - Magnetic
  - Mechanics
  - Fluid
  - Media
  - Thermal**
  - Math
  - ComplexMath
  - Utilities
  - Constants
  - Icons
  - Slunits



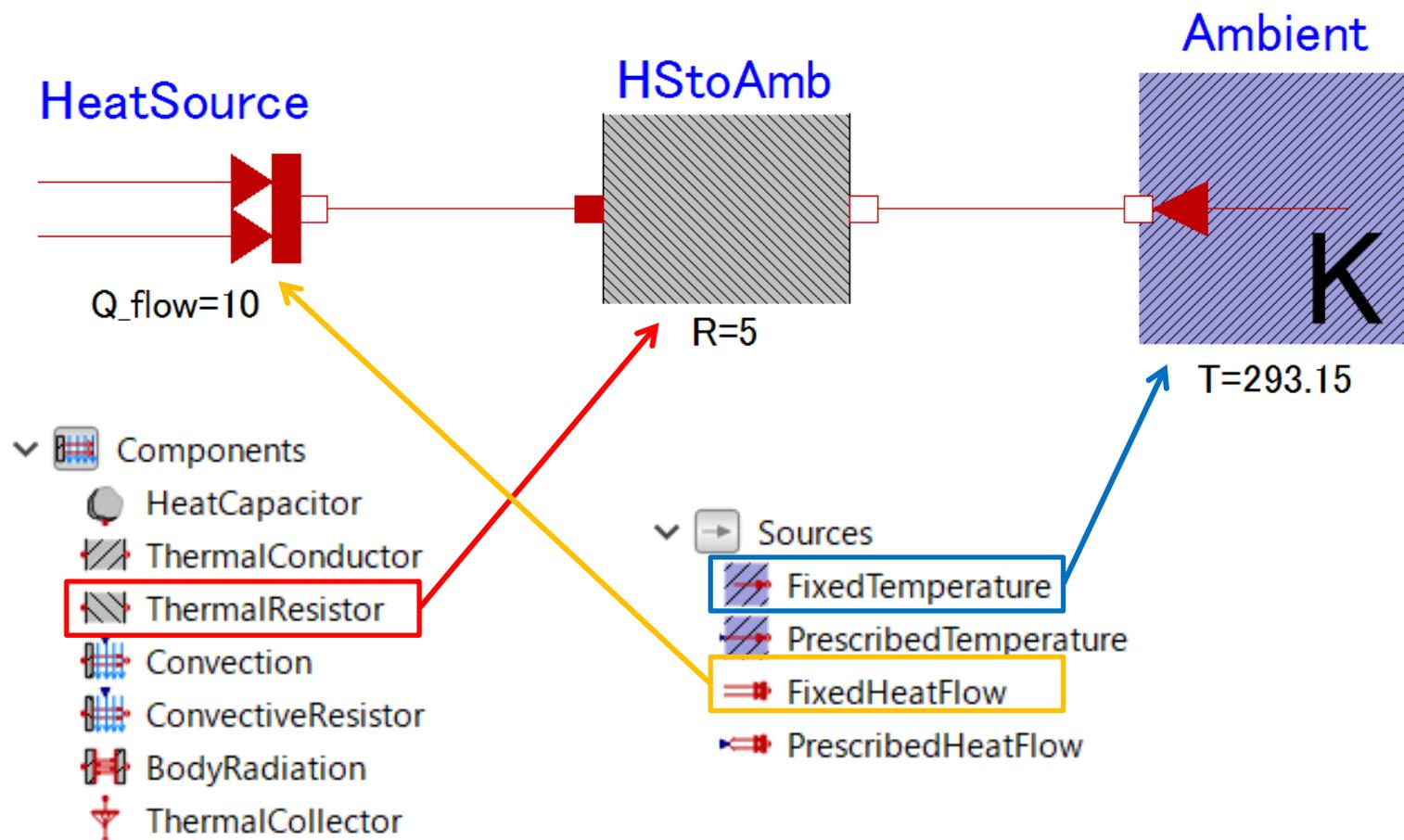
- Thermal
  - FluidHeatFlow
  - HeatTransfer**



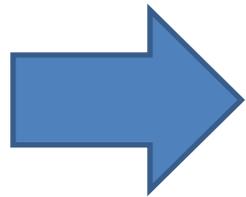
- HeatTransfer
  - Examples
  - Components
  - Sensors
  - Sources
  - Celsius
  - Fahrenheit
  - Rankine
  - Interfaces

# 最小構成の熱回路網

発熱源, 熱抵抗, 周囲温度から構成されるシンプルな熱回路網は以下の通り.

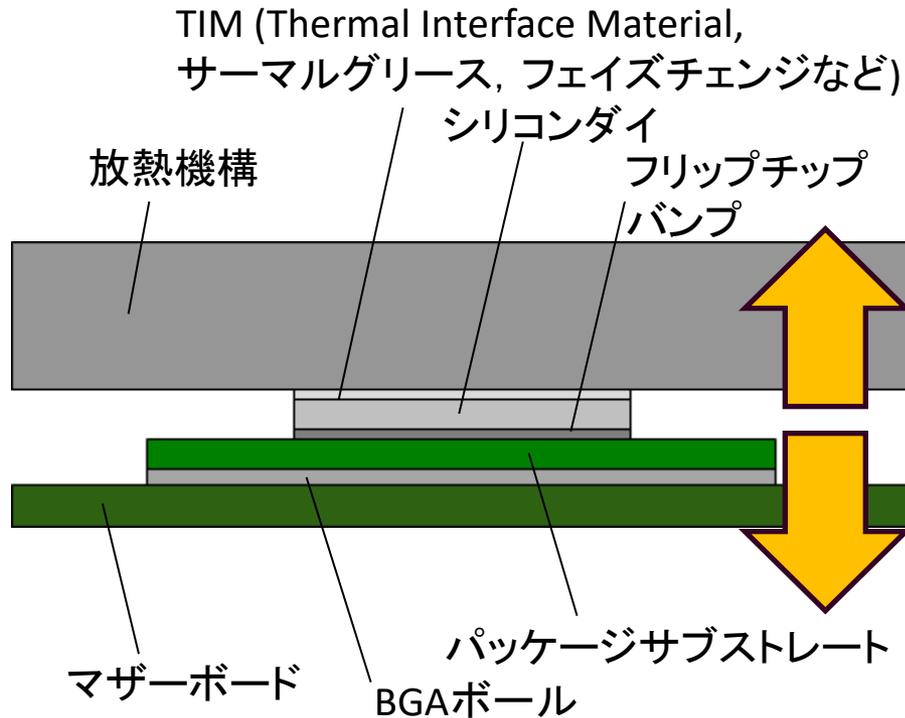


熱の流れは本来3次元. 1次元の熱抵抗 ( $l/kA$ ) で構成する場合, 3次元熱流体解析と同様に3次元で分割し計算しないと高精度な結果は得られない...



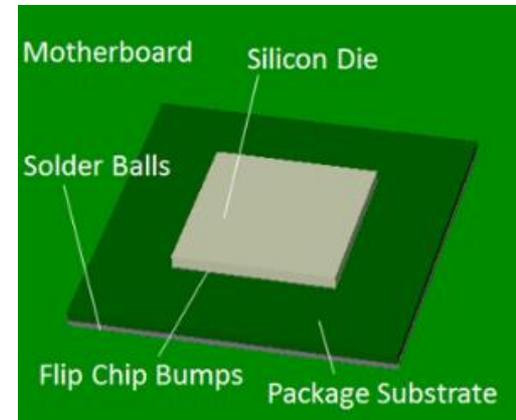
**熱の拡がりを表現する熱抵抗を定義できれば1次元でも高精度な計算ができる！**

# マイクロプロセッサの伝熱経路



伝熱経路

マイクロプロセッサはシリコンダイ回路面で発熱し、その熱はマザーボード側と放熱機構側に分かれて流れる。



マイクロプロセッサ

# 熱回路網による伝熱経路の表現

既存の熱回路網を1次元的に用いた場合、伝熱経路の構成が変わると、温度差を正しく表現できない。

本研究では、部材の熱抵抗、拡大熱抵抗、局所熱抵抗を組み合わせた熱回路網を新たに導入する。

部材の  
熱抵抗

$$\theta = \frac{l}{kA}$$

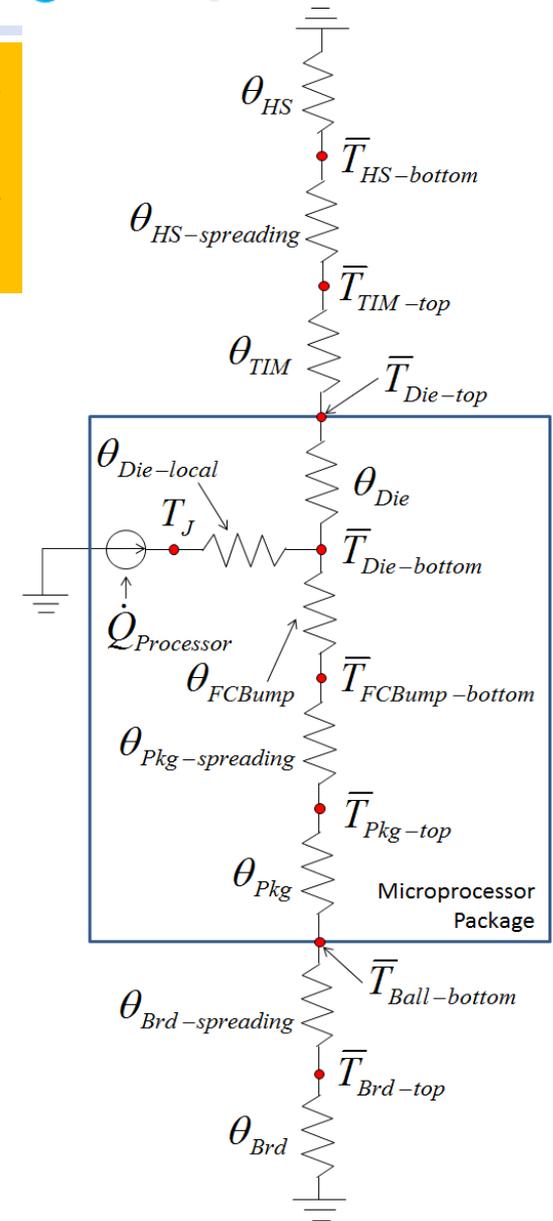
$$\theta = \frac{l}{kA} + \frac{1}{hA} \quad (\text{表面で熱伝達がある場合})$$

拡大  
熱抵抗

$$\theta_{spreading} = \frac{\bar{T}_{ip} - \bar{T}_i}{\dot{Q}_{in}}$$

局所  
熱抵抗

$$\theta_{Die-local} = \frac{T_J - \bar{T}_{Die-bottom}}{\dot{Q}_{Processor}}$$



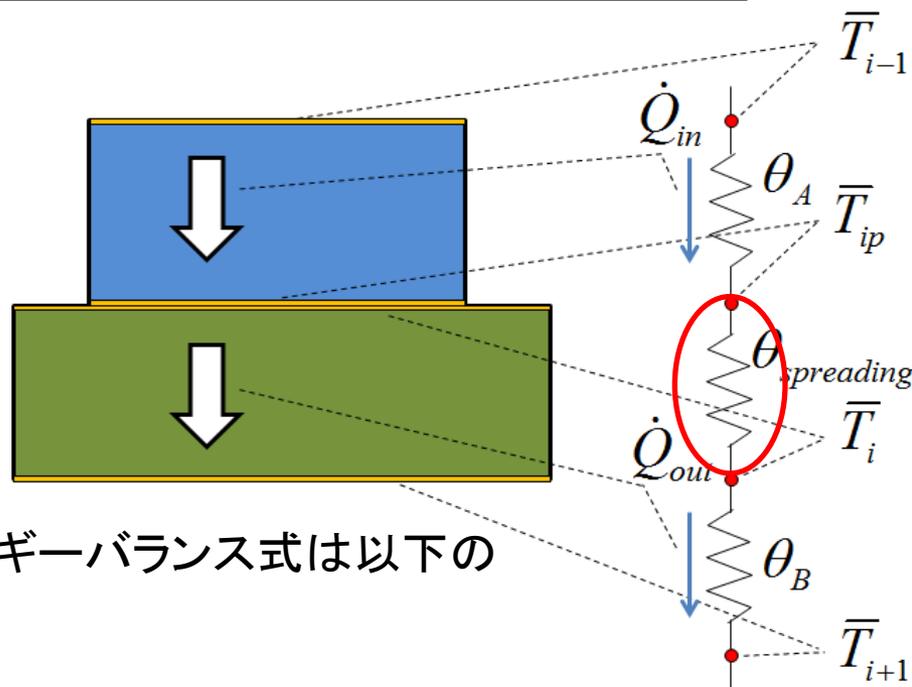
マイクロプロセッサのパッケージなど、電子機器では、サイズの異なる部材が隣接することが多い。サイズの小さい部材から大きな部材に熱が流れる際、拡大熱抵抗が生じる。

拡大熱抵抗

$$\theta_{spreading} = \frac{\bar{T}_{ip} - \bar{T}_i}{\dot{Q}_{in}}$$

Component A

Component B



部材Aと部材Bの断面積が異なる場合、エネルギーバランス式は以下のようになる。

$$\begin{aligned} & \dot{Q}_{in} - \dot{Q}_{out} \\ &= \frac{k_A A_A}{l_A} (\bar{T}_{i-1} - \bar{T}_{ip}) - \frac{k_B A_B}{l_B} (\bar{T}_i - \bar{T}_{i+1}) = 0 \end{aligned}$$

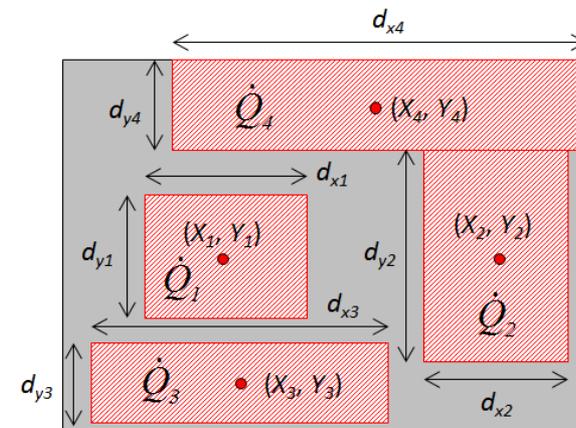
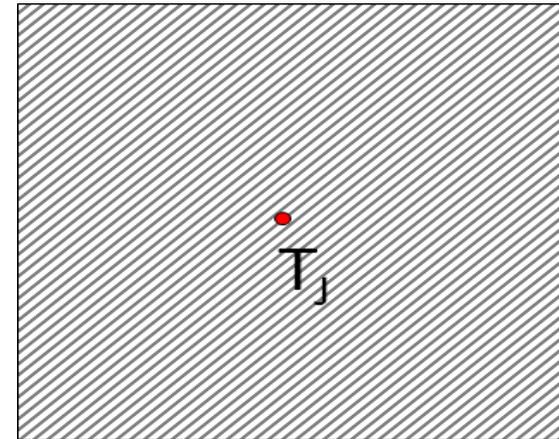
ここで、

$$\bar{T}_i = \int_{surface\ i} T dA$$

本研究で導入する熱回路網では、各ノードは部材表面の平均温度を示す。一方、シリコンダイで問題となるのはホットスポットにおける温度である。  
そこで、シリコンダイ底面における局所熱抵抗を以下のように定義する。

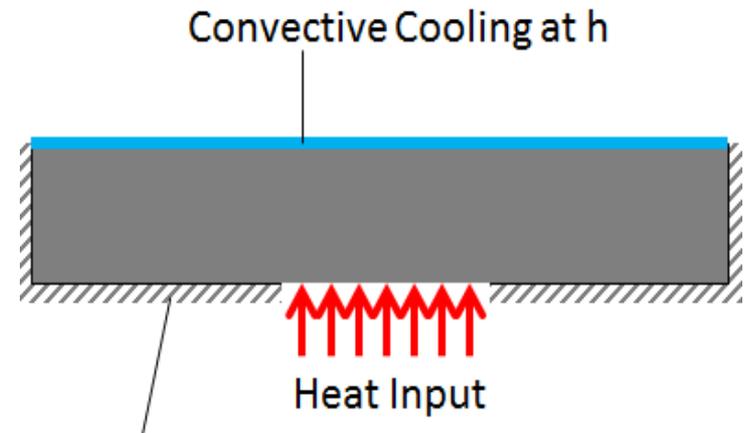
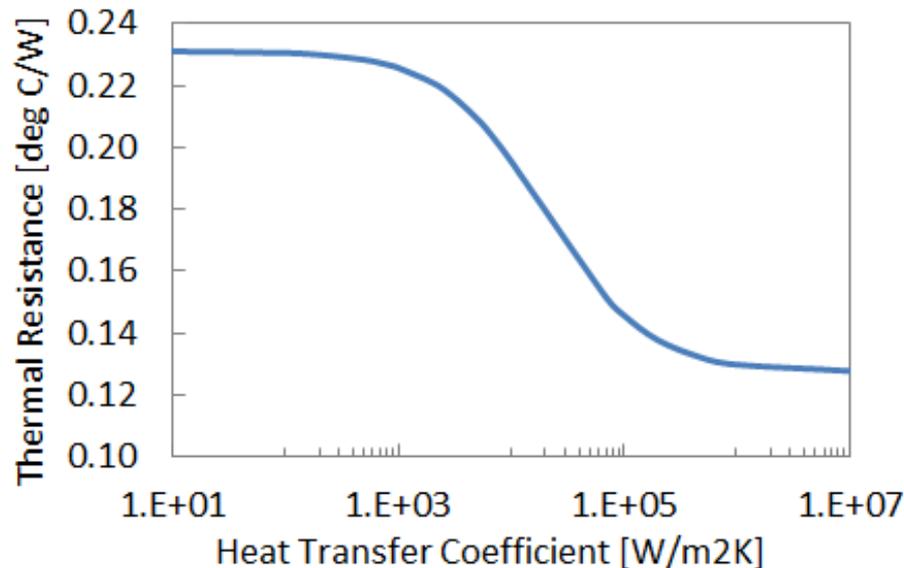
局所熱抵抗

$$\theta_{Die-local} = \frac{T_J - \bar{T}_{Die-bottom}}{\dot{Q}_{Processor}}$$



# 第3種境界条件による熱伝達率と 拡大熱抵抗の関係

境界条件さえ決まれば拡大熱抵抗や局所熱抵抗の値は決まる。特に、その部材において、熱の流れの上流側表面の伝熱量分布が既知で、下流側表面の温度勾配と熱流束の関係を第3種境界条件で表現できる場合、熱抵抗値は解析解から求めることが可能である。



Thermal Insulation

Heat sink base block

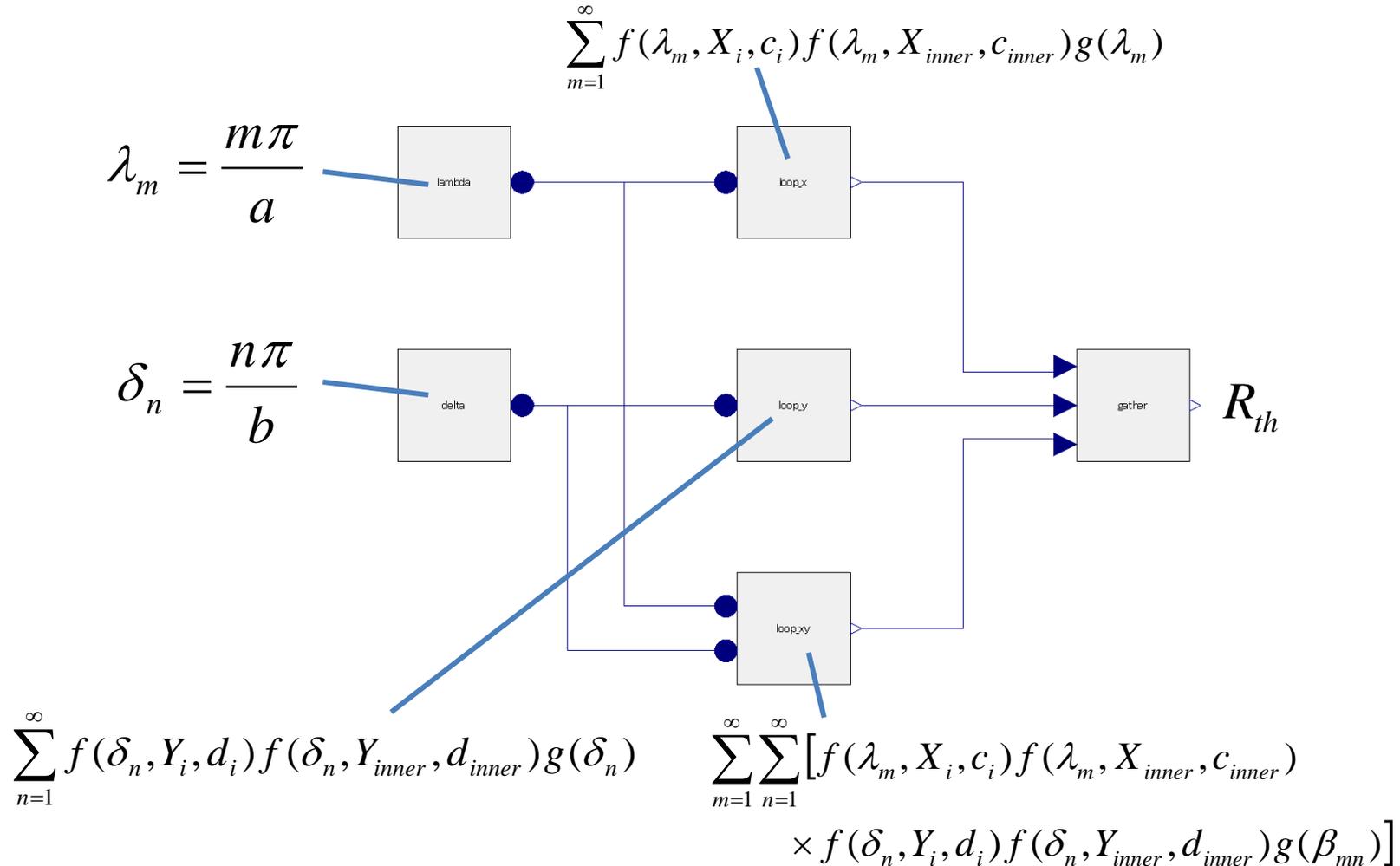
(50 × 50 × 5.0 mm, 209W/mK)

この関係を伝熱経路途中に存在する部材に適用することができれば、拡大熱抵抗を個別に求めることが可能になる。

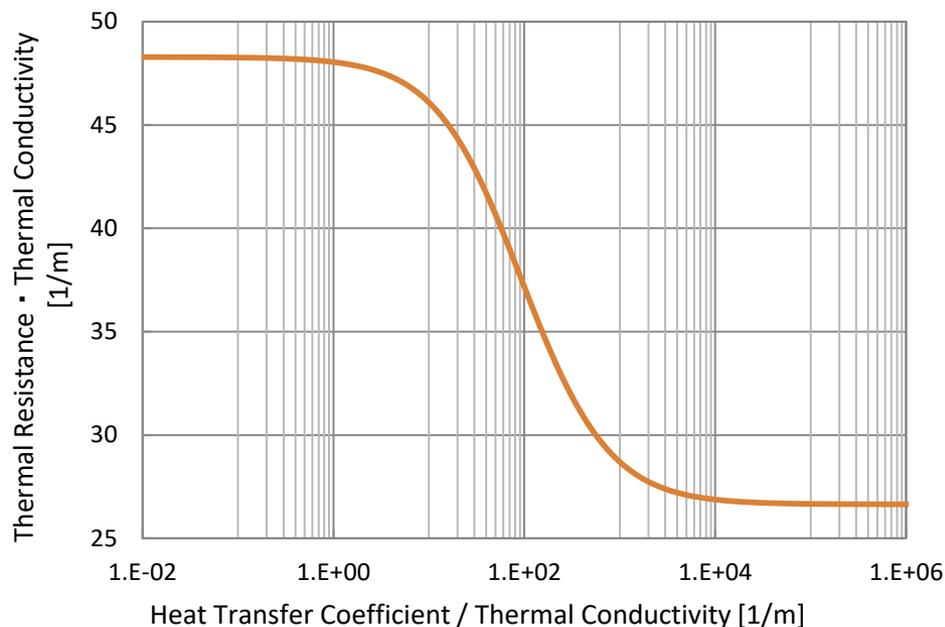
※ 以下の文献より引用。

K. Nishi, T. Hatakeyama, S. Nakagawa and M. Ishizuka, "Thermal Spreading Resistance and Thermal Local Resistance Evaluations by Iterative Calculation", 39, ISTP-25 (2014).

フーリエ級数をモデルとして実装.

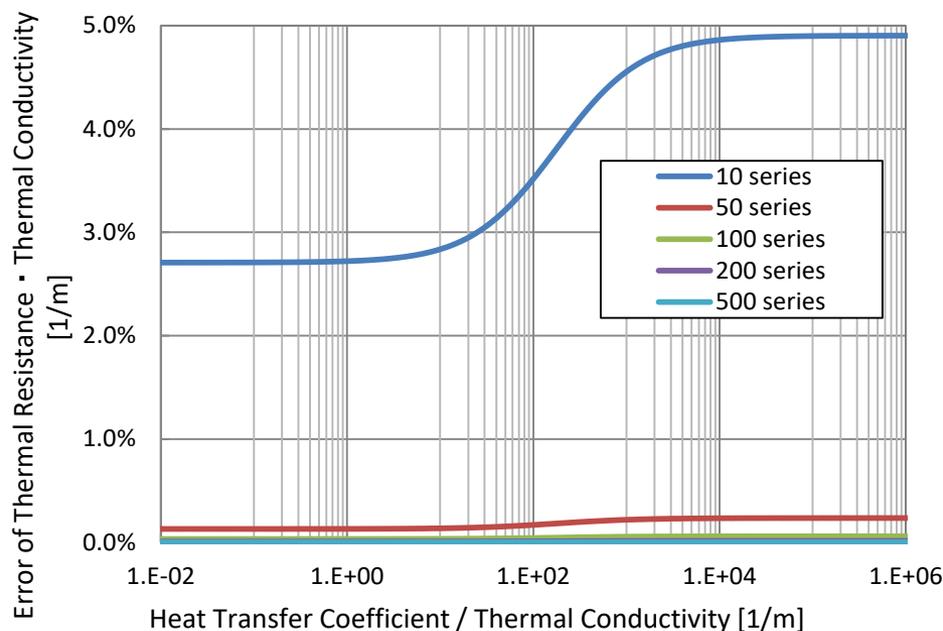


等方性熱伝導率を有する50x50x5mmの部材の底面中央10x10mmのエリアで均一発熱させた際の拡大熱抵抗の変動. 部材の熱伝導率に依らず, 整理することができる.



$h/k$ が1~10000の間で拡大熱抵抗は大きく変動する.

フーリエ級数を計算する際には、打ち切り誤差についても考慮する必要がある。以下のグラフは1000項までの計算結果に対する誤差を示している。100項の計算では、誤差を0.1%未満に抑えることができる。

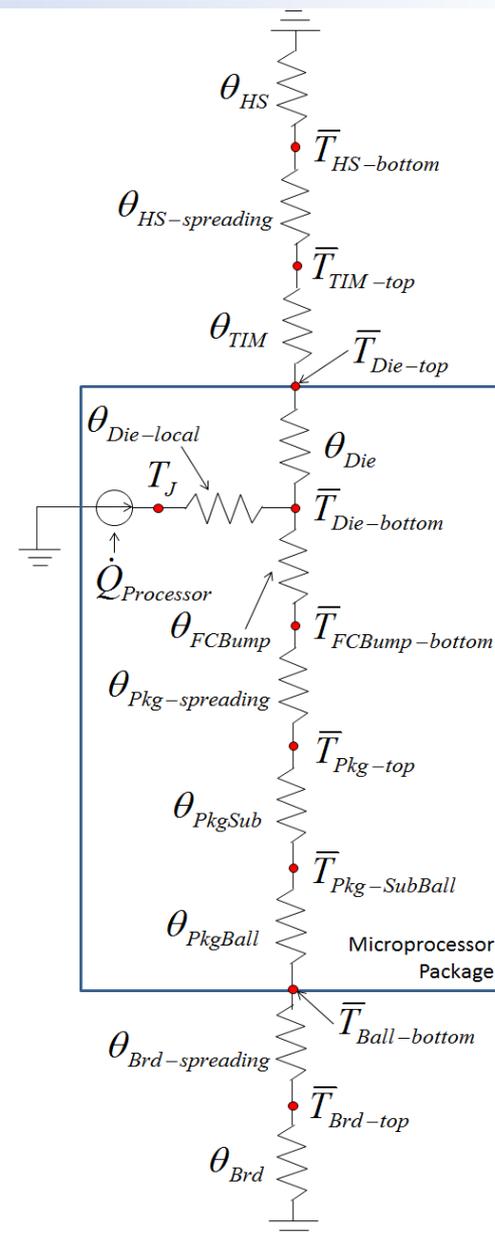
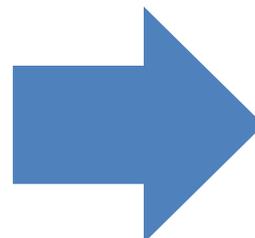
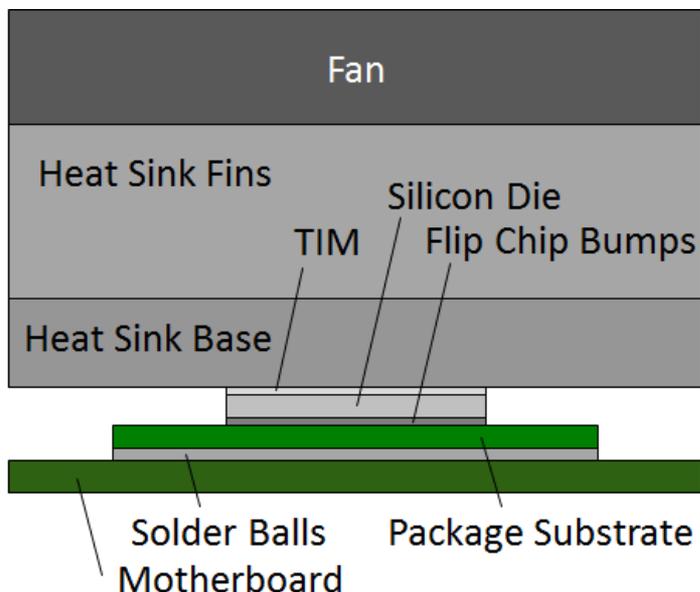


熱抵抗の計算では、誤差の絶対値も重要である。  
1W/mKの部材の場合、100項の計算により、誤差を0.016°C/W未満に抑えることができる。

# 1次元熱回路網の構築

1次元熱回路網は以下のコンポーネントで構成される。

- 部材の熱抵抗(熱抵抗と熱容量)
- 拡大熱抵抗
- 局所熱抵抗



※ 以下の文献より引用。

K. Nishi, T. Hatakeyama, S. Nakagawa and M. Ishizuka, "Thermal Spreading Resistance and Thermal Local Resistance Evaluations by Iterative Calculation", 39, ISTP-25 (2014).

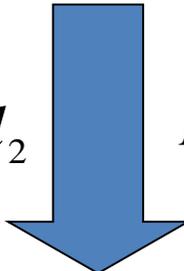
オープンCAEシンポジウム2017@名古屋 2017/12/8

既存のモデル式には半導体特性に関連するパラメータが多く含まれており、その一部は公開されていない。本研究では、消費電力の実測からパラメータを求めることのできる、マイクロプロセッサの発熱量のモデル化を行った。

マイクロプロセッサを含むCMOS集積回路の消費電力は、以下のようにダイナミック成分とスタティック成分から構成される。

$$Power = \underbrace{aC_{load}V_{DD}^2 f_{op}}_{\text{ダイナミック消費電力}} + \underbrace{I_{leak}V_{DD}}_{\text{スタティック消費電力}}$$

$a$  : 動作率  
 $C_{load}$  : 負荷容量  
 $V_{DD}$  : 電源電圧  
 $f_{op}$  : 動作周波数  
 $I_{leak}$  : リーク電流


$$aC_{load} = d_1V_{DD} + d_2 \quad \quad \quad I_{leak} = s_1(T^2 + s_2T + s_3)(V_{DD} + s_4)$$

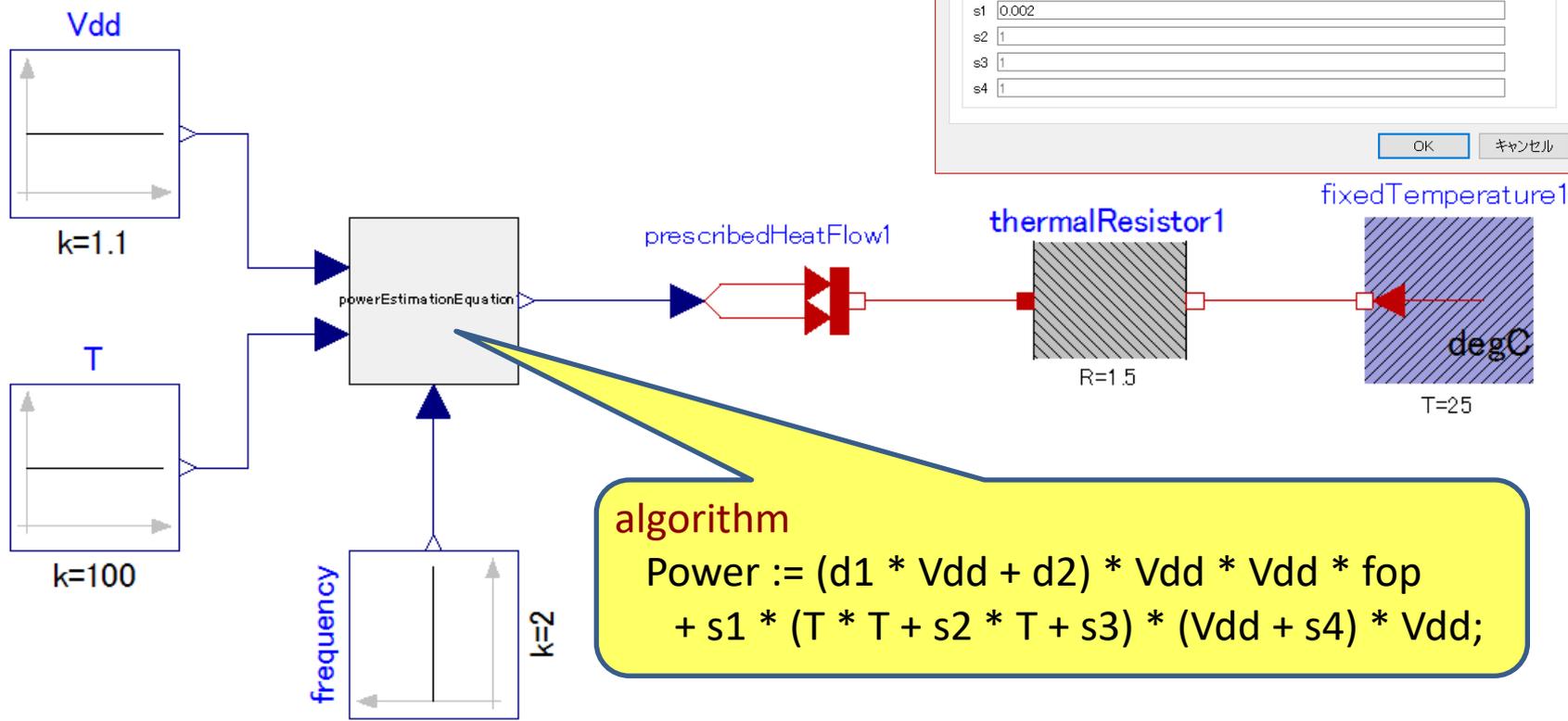
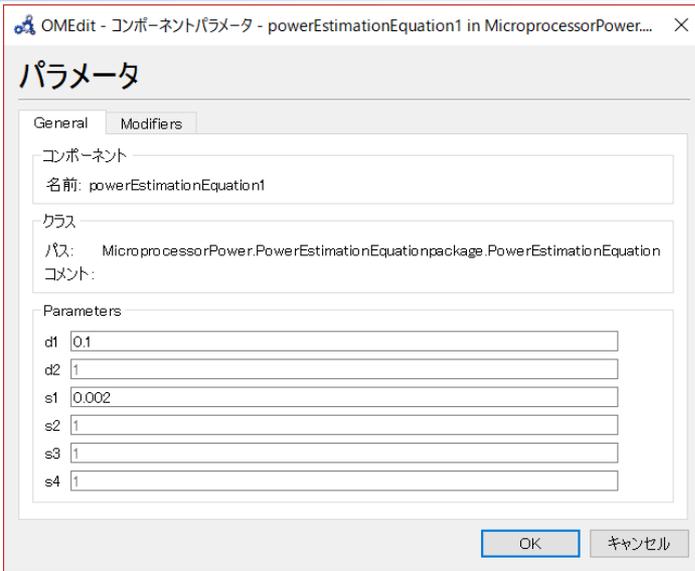
$d_1$ 及び $d_2$ は係数  $s_1, s_2, s_3$  及び $s_4$ は係数

システムレベルの熱解析を目的として、以下の消費電力推定式を導出した。

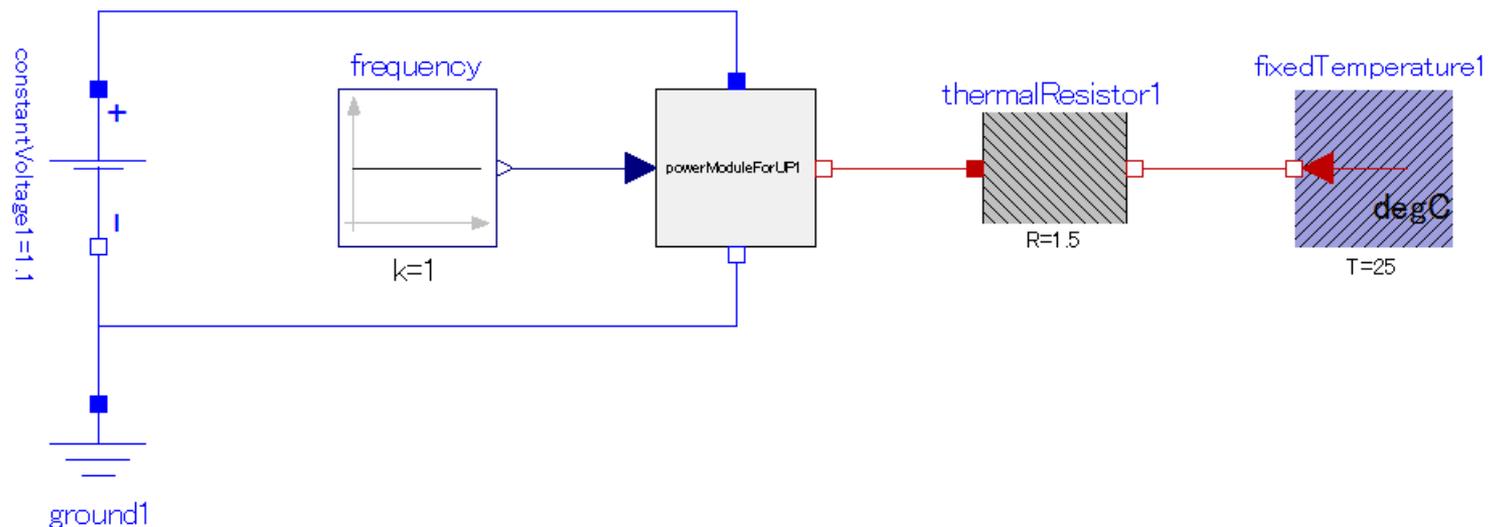
$$Power = (d_1V_{DD} + d_2)V_{DD}^2 f_{op} + s_1(T^2 + s_2T + s_3)(V_{DD} + s_4)V_{DD}$$

T: シリコンダイ温度

発熱量のモデル式をModelicaのalgorithmとして表現.



電圧を電気ドメインに接続，発熱量と温度が連動するようにモデル化することで，電気ドメインと伝熱ドメインの連成問題として扱うことができる。



本発表では、Modelicaによる熱回路網の構築とマイクロプロセッサの温度予測について紹介した。

- 通常の熱回路網は、Modelica.Thermal.HeatTransferサブライブラリのコンポーネントを組み合わせて構築できる。
- Modelicaでは、コンポーネントを自作することで独自のアルゴリズムを実装可能である。
- Modelicaを用いることで、マイクロプロセッサの温度予測を行うための熱回路網を実装することができ、3次元のシミュレーションとほぼ同等の結果を与えることができる。
- Modelicaでは、マルチドメインを扱うことができるため、熱回路網だけでなく、発熱源も電氣的にモデル化可能である。

