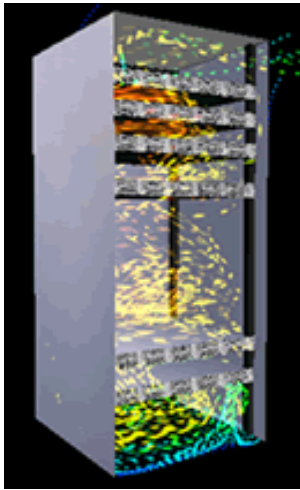


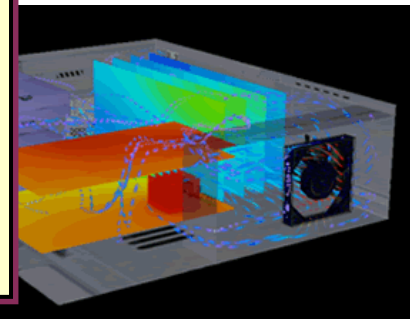
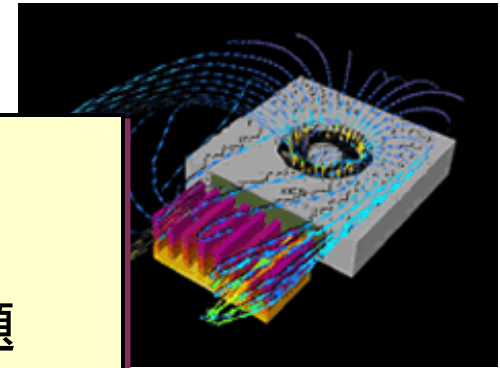
熱設計プロセスにおける シミュレーションの活用



はじめに

1. 熱設計の現状
2. シミュレーション活用に向けての課題
3. CAE活用に必要な技術
4. 熱設計プロセスとシミュレーション活用
5. 熱設計プロセス
6. シミュレーション精度を高める

まとめ



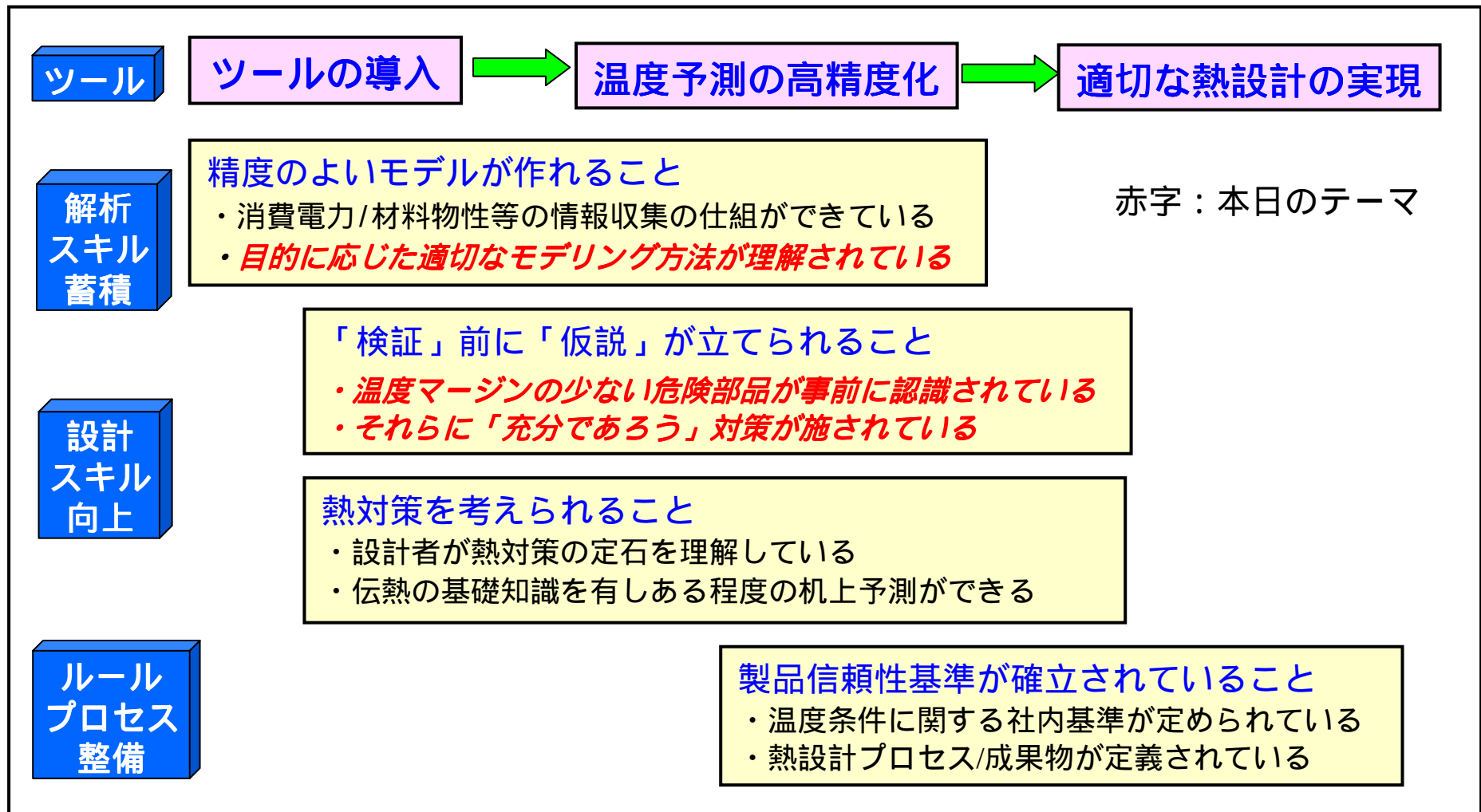
はじめに 本日の講演主旨

シミュレーションの導入 ≠ 温度が正確に予測できる ≠ 適切な熱設計ができる

シミュレーション活用の3条件

設計上流段階で熱対策が織り込まれている
解析結果可否判断基準が明確になっている

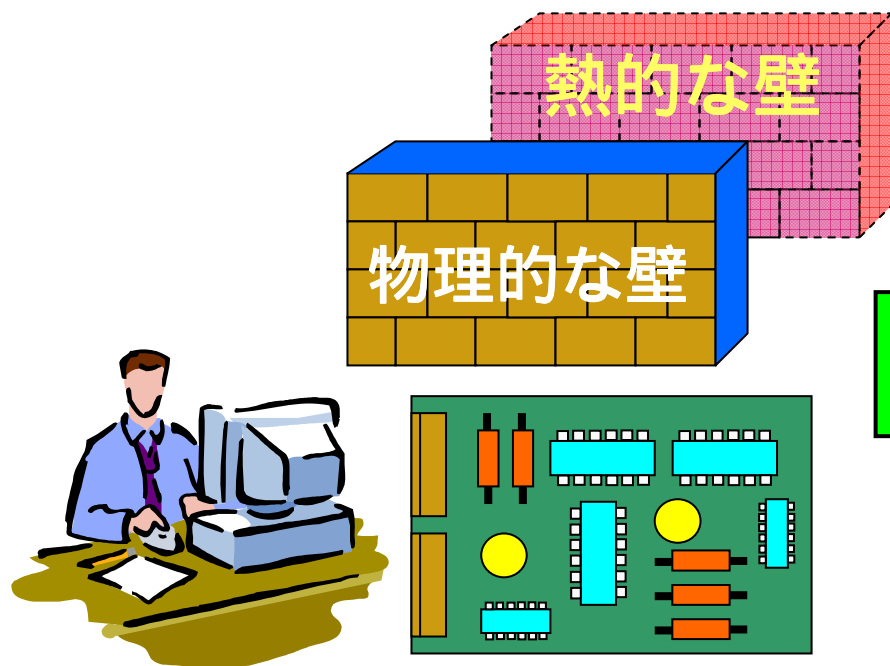
検証すべき部位が明確になっている



1. 熱設計の現状

上流熱設計が必要になった理由

旧来の熱設計

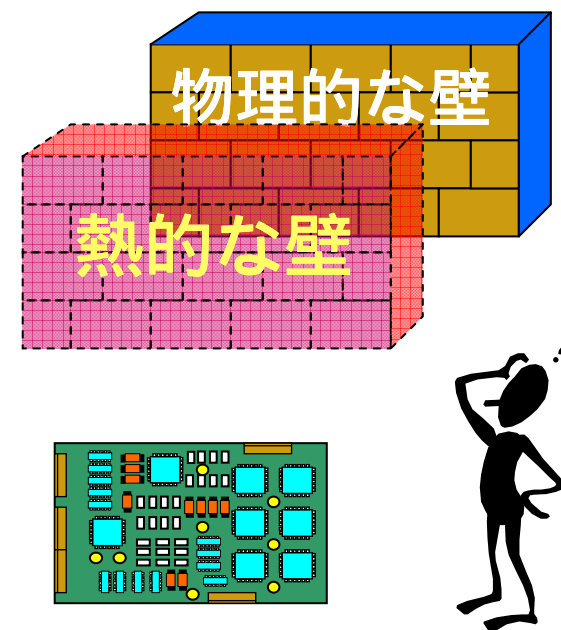


部品を最大限並べても、物理的な制約で高密度化できなかった。

熱の壁の前に物理的な壁が存在

それほど熱を意識しなくてもOK
試作後の熱対策も比較的容易

現在の熱設計



部品を詰め込むと、簡単に熱の壁を越える高密度実装になってしまう

物理的な壁の前に見えない熱の壁！

**熱の壁を見ながら設計を行わないと
冷却不能な製品を作ってしまう！**

1. 熱設計の現状

熱設計はマクロからミクロへ

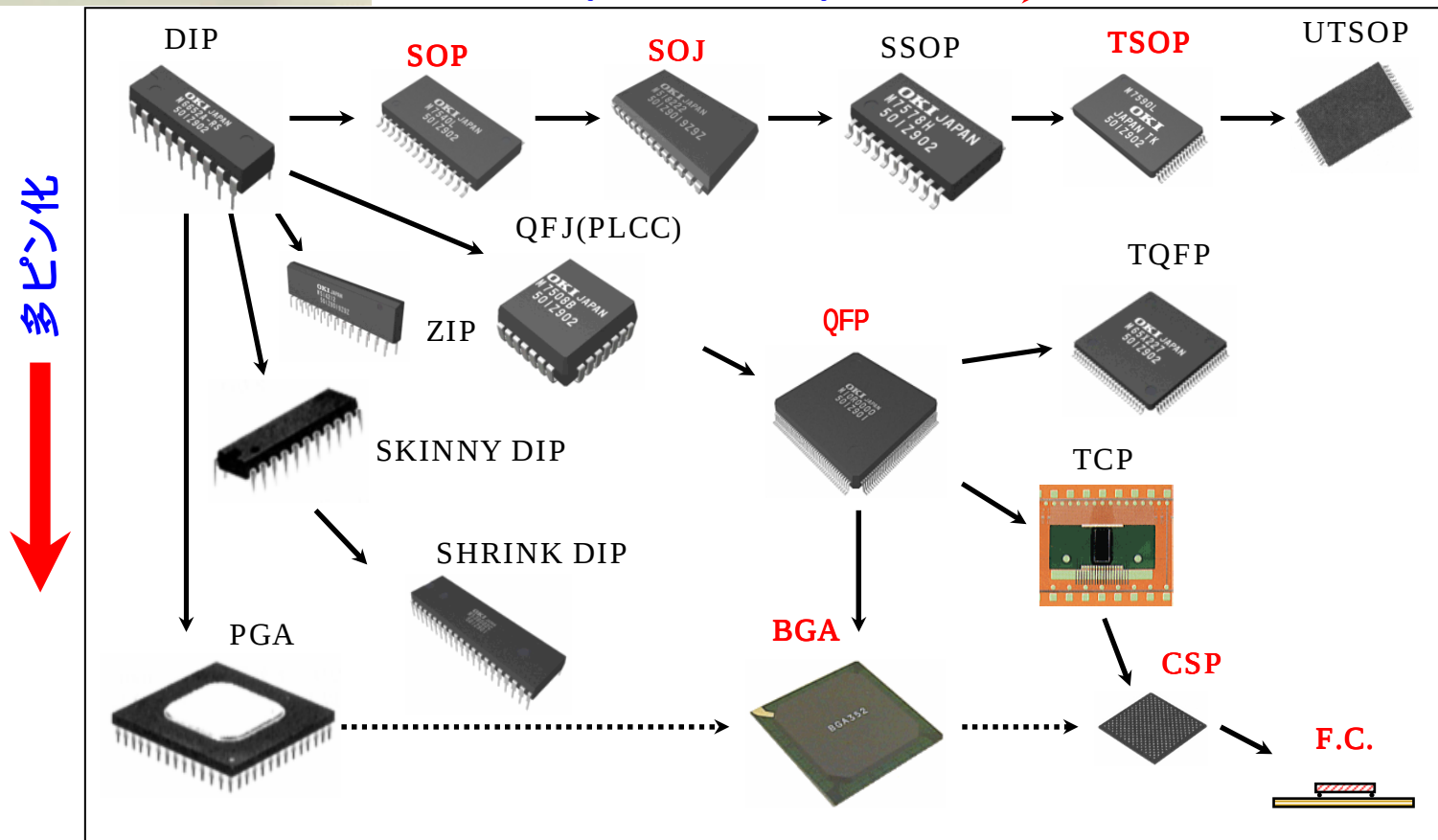


部品：大きなパッケージで小電力 表面電力密度(W/m²)小

筐体：大型筐体、広い空間、大きな通風口

⇒ 筐体の内部温度保証ができれば部品はほぼ安全だった

小型化（表面実装型）



個々の部品の温度保証ができないと熱設計は不完全
さらに機器表面温度も抑えなければならない



1. 熱設計の現状

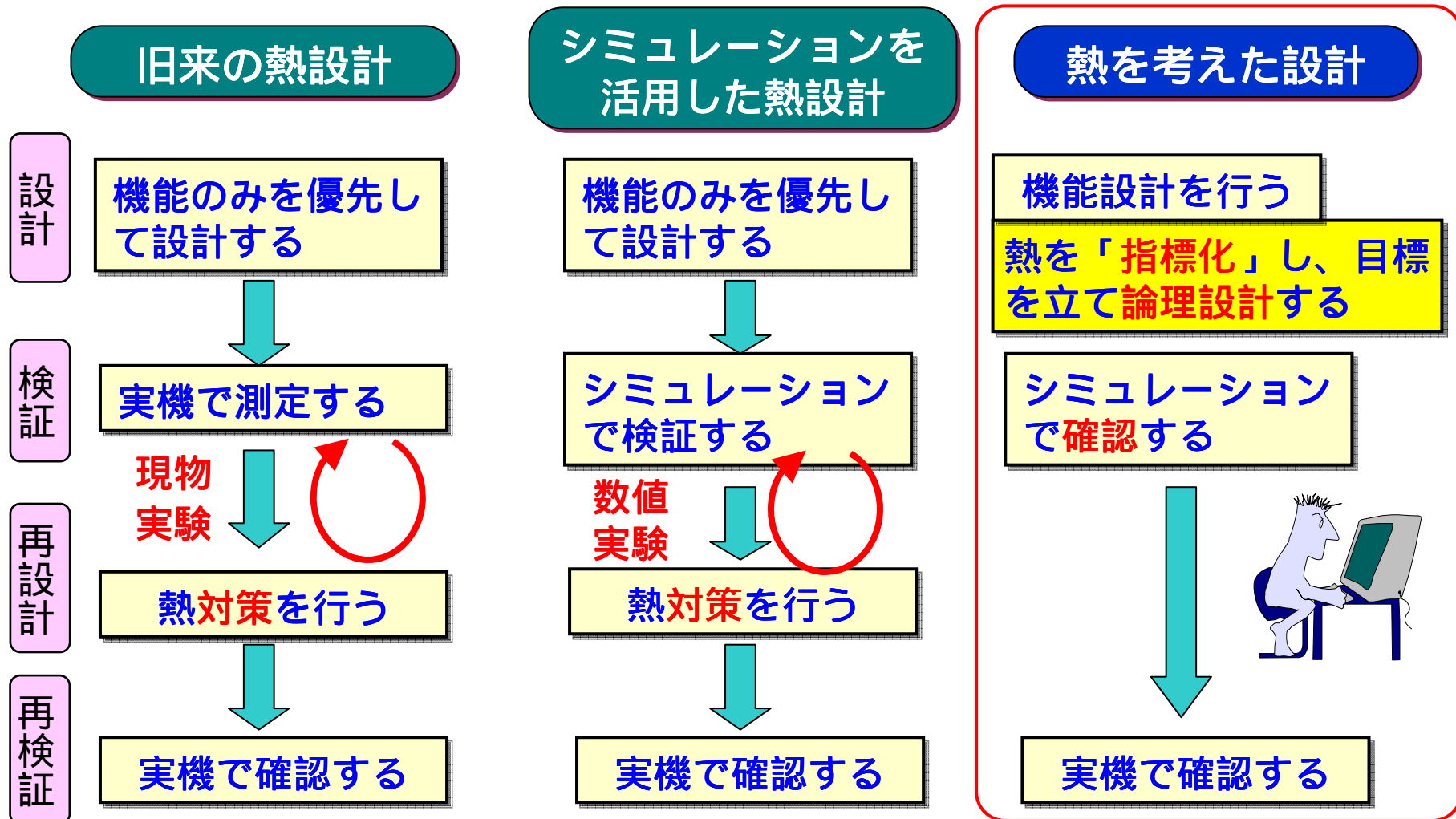
熱を考えた設計とは何か？

■ シミュレーションを活用した設計 ≠ 熱を考えた設計

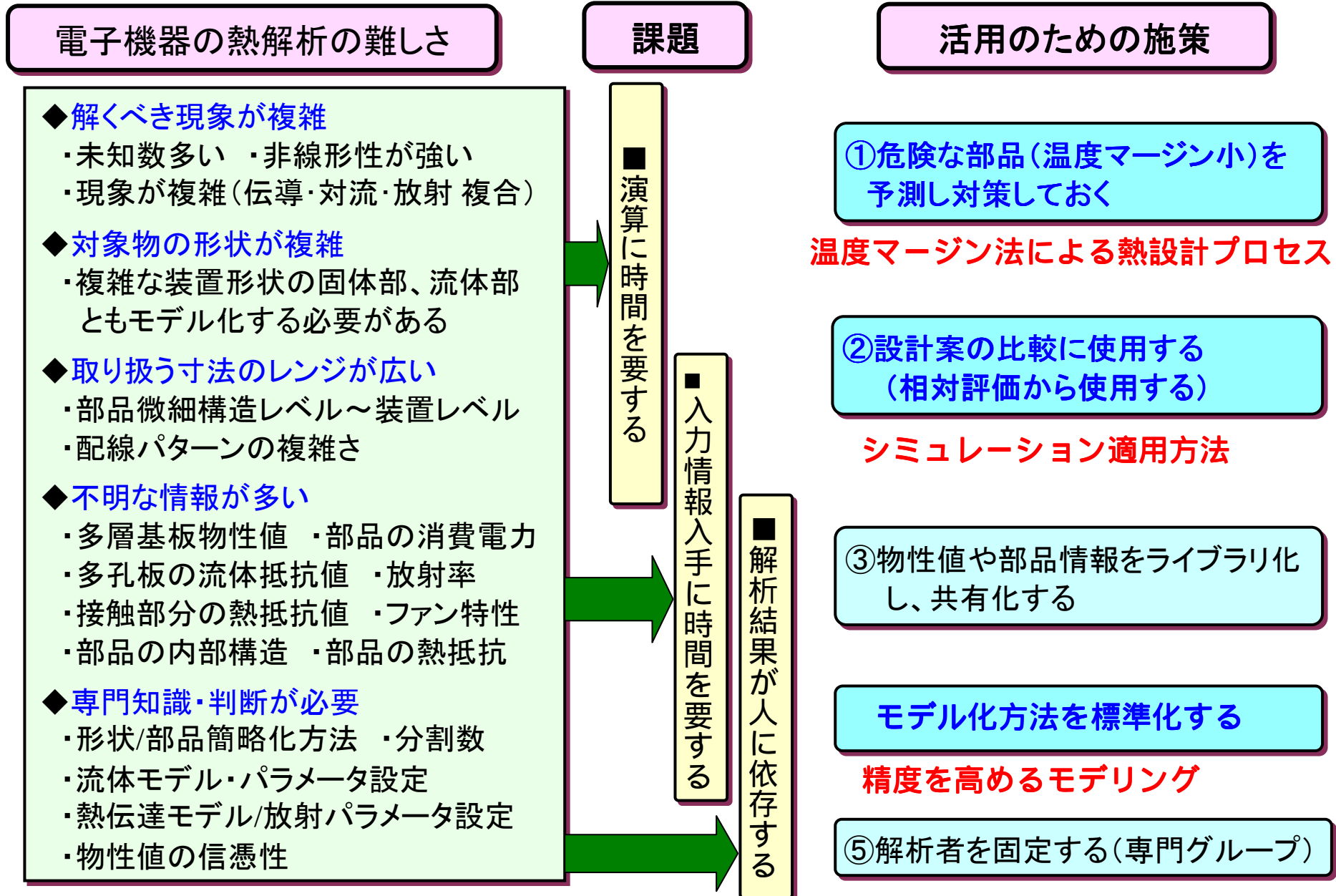
開発スキームは旧来のプロセスと同じ、「熱設計」がなく「熱対策」

■ 熱設計にも論理設計と物理設計がある。熱設計 = 熱の論理設計

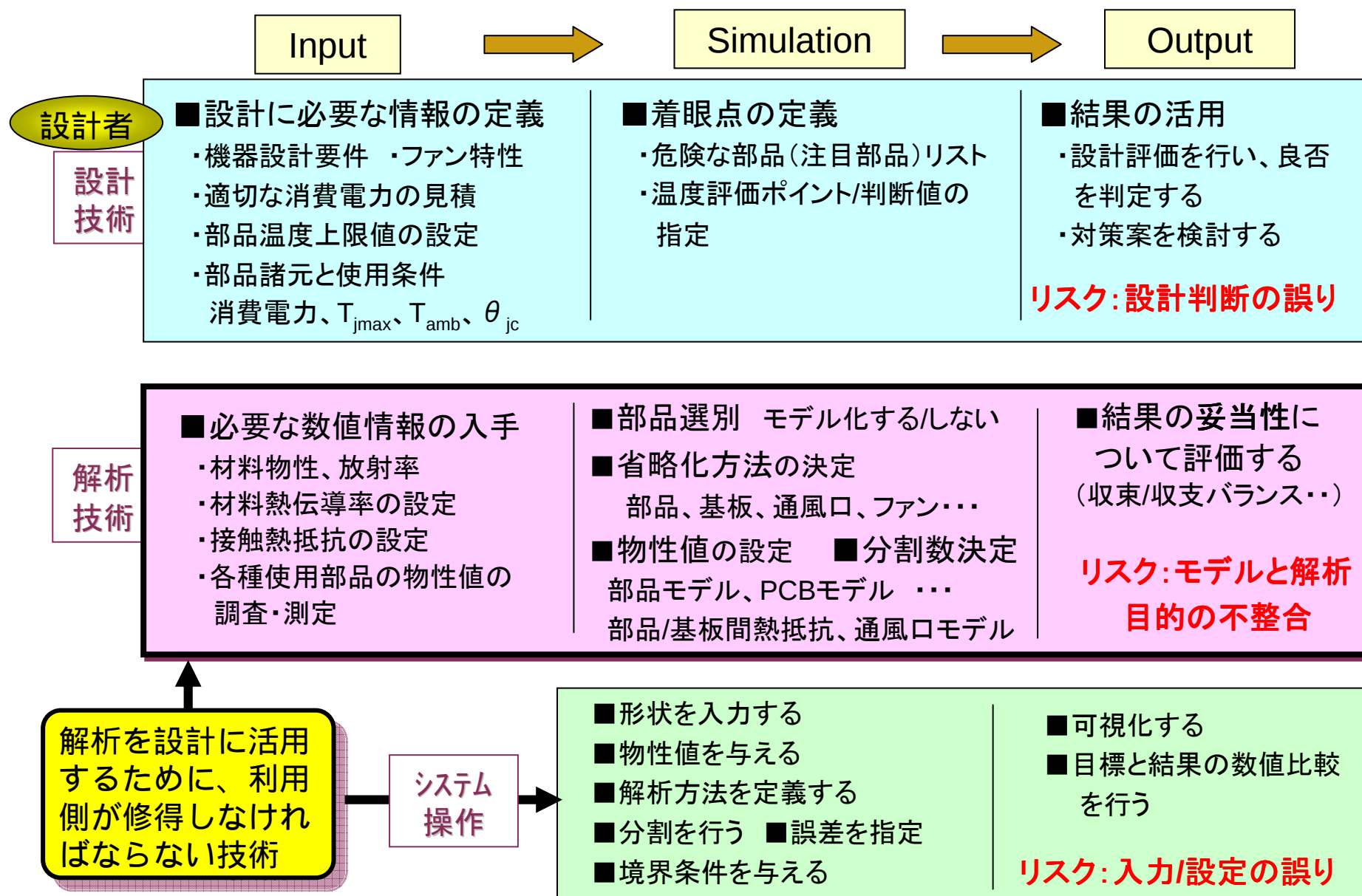
■ シミュレーションは必要条件だが十分条件ではない（検証には「仮説」が必要）



2. シミュレーション活用に向けての課題



3 . CAE活用に必要な技術



4. 熱設計プロセスとシミュレーション活用

絵を描く前(具体設計前)

①温度条件の把握

- 設計対象電子機器の温度条件・消費電力、使用環境等の確認と冷却方式の検討
- 実装部品の温度条件確認チップ温度、ケース温度、周囲温度上限等

②熱設計(熱の論理設計)

機器内部温度評価

- ・機器筐体内部温度(MAX)を計算する

機器熱対策

- ・機器筐体の内部温度低減策を検討
 - 換気風量の増大 -筐体表面積の拡大

システムアプローチ

コンポーネントアプローチ

部品の温度マージン評価

- ・全部品の単体/実装温度マージンを求める

部品の熱対策(論理設計)

- ・マージンのない部品に対し、熱伝達率増大面積拡大の視点から、対策を練る

絵を描く時

③熱対策(「熱設計」で決まった方針を具体化する)

■レイアウト対策の検討

- まず、マージンの少ない順に優位な場所に配置する。自然空冷:下方、強制空冷:風上
- 吸気口の突入風速利用 など

■レイアウト対策でクリアできないものの対策

- ・放熱面積拡大の検討(放熱板、周囲へ伝熱、ヒートパイプ等)
- ・放射率増大策の検討
- ・風速増大策の検討(ファン、流路絞り、煙突)

シミュレーション活用
(案の比較検討)

絵を描いた後

④対策結果の検証と確認

- シミュレーションや実験により、対策効果の確認と妥当性の評価を行い、電力性能係数などで熱設計の出来栄を最終評価する

シミュレーション活用(良否判断)

5. 熱設計プロセス(1)

危険な部品の予測

- 部品の熱的な厳しさは、表面の熱流束に依存する。部品を漠然と眺めても、危険な部品はわからない。予測し、対策するには・・・

(1) 熱流束の大きさで判断

部品の熱流束を求め、熱的に厳しい部品をリストアップする

(2) 部品温度マージンから判断

部品の温度上昇計算式を用いて、温度マージンを計算する

いったいどの部品が危険か？
どの部品に対策が必要か？

部品 名称	ジャンク ション 温度上限 (°C)	部品外形寸法(mm)			消費 電力 (W)	R _{jc} (K/W)
		縦	横	高さ		
IC1	100	20.8	20.8	3.3	0.62	2
IC2	100	18	18	2	0.38	1.7
IC3	125	4.8	30	15	0.6	3.7
IC4	125	9	9	1.4	0.6	1.2
IC5	100	35	35	2.3	2.2	1.1

5. 熱設計プロセス(1)

危険な部品の予測

- 部品の熱的な厳しさは、表面の熱流束に依存する。部品を漠然と眺めても、危険な部品はわからない。予測し、対策するには・・・

(1) 熱流束の大きさで判断

部品の熱流束を求め、熱的に厳しい部品をリストアップする

(2) 部品温度マージンから判断

部品の温度上昇計算式を用いて、温度マージンを計算する

熱流束を求めることでIC 4 が飛びぬけて
厳しいことが分かる

部品 名称	ジャンク ション 温度上限 (°C)	部品外形寸法(mm)			消費 電力 (W)	R _{jc} (K/W)	部品 表面積 (mm ²)	熱流束 (W/m ²)
		縦	横	高さ				
IC1	100	20.8	20.8	3.3	0.62	2	1139.84	543.9
IC2	100	18	18	2	0.38	1.7	792	479.8
IC3	125	4.8	30	15	0.6	3.7	1332	450.5
IC4	125	9	9	1.4	0.6	1.2	212.4	2824.9
IC5	100	35	35	2.3	2.2	1.1	2772	793.7

5. 熱設計プロセス(1) 危険な部品の温度マージン計算

■ 部品温度マージンを計算する

部品の温度上昇計算式(次頁)を用いて、温度マージンを計算する

外気温度	45	筐体内部空気温度上昇		20															
部品名称	ピン数 又は 形状種別	チップ 温度上限 ()	ケース 温度上限 ()	外形寸法(mm)			消費 電力 W	R _{jc} /W	部品 放射率	追加 表面積	面積拡 大率	風速 m/S	部品周囲 空気温度 上昇低減 率 (0~1)	部品単体温度上昇		部品単体 温度マージン		機器実装時 温度マージン	
				縦 又は直径	横	高さ								ケース	チップ	ケース	チップ	ケース	チップ
IC1	80	100	90	20.8	20.8	3.3	0.62	2	0.8	0	1	0	1	23.75	24.99	21.25	30.01	1.25	10.01
IC2	128	100	90	18	18	2	0.38	1.7	0.8	0	1	0	1	19.95	20.60	25.05	34.40	5.05	14.40
IC3	24	125	110	4.8	30	15	0.6	3.7	0.8	0	1	0	1	23.62	25.84	41.38	54.16	21.38	34.16
IC4	8	125	110	9	9	1.4	0.6	1.2	0.8	0	1	0	1	58.42	59.14	6.58	20.86	-13.42	0.86
IC5	257	100	90	35	35	2.3	2.2	1.1	0.8	0	1	0	1	37.59	40.01	7.41	14.99	-12.59	-5.01

温度マージンの計算方法

部品温度上限がケース温度で定められる場合

$$T_m = T_{cmax} - \Delta T_c - \Delta T_a - T_\infty$$

部品温度上限がジャンクション温度で定められる場合

$$T_m = T_{jmax} - \theta_{jc} \times P - \Delta T_c - \Delta T_a - T_\infty$$

部品温度上限が部品周囲空気最高温度で定められる場合

$$T_m = T_{amax} - \Delta T_a - T_\infty$$

計算はThermocalc V12を使用、詳細は <http://www.thermo-clinic.com> 参照

【参考】 部品温度マージンの計算

- 部品温度マージンは、最終的には製品の実測により確認されるものであるが、設計上流段階（形を描く前）で把握できない限り、定量的熱設計はできない。
- 部品温度マージン計算に必要な ΔT_c 、 ΔT_a は、以下の式で推定できる

部品単体の温度上昇 ΔT_c の推定計算

$$\Delta T_c = W / (S \cdot h)$$

自然空冷の場合 $h = 2.51 \times 0.96 \times (\Delta T_c / L)^{0.25} + \sigma \varepsilon (T_c^2 + T_a^2)(T_c + T_a)$

強制空冷の場合 $h = 3.86 (u / L)^{0.5} + \sigma \varepsilon (T_c^2 + T_a^2)(T_c + T_a)$

ΔT_c ：部品ケース温度上昇（℃） $= T_c - T_a$ 、 W ：部品消費電力(W)、 ε ：部品表面の放射率

T_c ：部品ケースの絶対温度（K）、 T_a ：周囲空気の絶対温度（K）、 σ ：ステファンボルツマン定数

S ：部品表面積(m²)、 L ：部品の代表長(m) 自然空冷：縦×横×2 / (縦+横)

ただし、小型の部品では配線パターンからの放熱比率が大きくなるため、配線パターンのフィン効率を計算し等価放熱面積を求め、 S を補正する必要がある

機器内部空気温度上昇 ΔT_a の推定計算

$$W = (2.8 S_{TOP} + 2.2 S_{SIDE} + 1.5 S_{BOT}) (\Delta T_a / 2)^{1.25} + 4 \sigma \varepsilon S_{TOT} T_m^3 \cdot (\Delta T_a / 2) + 1150 \cdot Q_v \cdot \Delta T_a$$

S ：筐体各面の表面積（m²）、添字 TOP：上面、SIDE：垂直面、BOT：底面、TOT：全面

ΔT_a ：内部空気温度上昇、 σ ：ステファンボルツマン定数（ $= 5.67 \times 10^{-8}$ ）

ε ：筐体表面の放射率、 T_m ：平均絶対温度（ $= 273 + \text{周囲温度} + \Delta T_a / 4$ ）

Q_v ：実効換気風量（自然空冷では、 $= \text{通風孔面積} \times 0.2 \text{m/s}$ ）

上記式は反復計算が必要であり、全ての部品について温度マージンを求めるのは大変である。また、配線パターンの放熱や機器の実効換気風量など、手計算では正確に推定することが困難なパラメータも多い。プログラム化しておくとう便利である。

Thermocalc

5. 熱設計プロセス(2) 危険な部品の論理対策

■ 熱対策は 有効表面積拡大 熱伝達率増大 周囲空気温度低減 しかない

3つのアプローチで論理的な対策を行う

表面積拡大 IC4はベタパターン設置で可能性あり、IC5はヒートシンクが必要

部品名称	ピン数 又は 形状種別	チップ 温度上限 ()	ケース 温度上限 ()	外形寸法(mm)			消費 電力 W	R j c /W	部品 放射 率	追加 表面 積	面積拡 大率	風速 m/S	部品周囲 空気温度 上昇低減 率 (0~1)	部品単体温度上昇		部品単体 温度マージン		機器実装時 温度マージン	
				縦 又は直径	横	高さ								ケース	チップ	ケース	チップ	ケース	チップ
IC1	80	100	90	20.8	20.8	3.3	0.62	2	0.8	0	1	0	1	23.75	24.99	21.25	30.01	1.25	10.01
IC2	128	100	90	18	18	2	0.38	1.7	0.8	0	1	0	1	19.95	20.60	25.05	34.40	5.05	14.40
IC3	24	125	110	4.8	30	15	0.6	3.7	0.8	0	1	0	1	23.62	25.84	41.38	54.16	21.38	34.16
IC4	8	125	110	9	9	1.4	0.6	1.2	0.8	150	1	0	1	44.10	44.82	20.90	35.18	0.90	15.18
IC5	257	100	90	35	35	2.3	2.2	1.1	0.8	2000	1	0	1	24.38	26.80	20.62	28.20	0.62	8.20

熱伝達率増大 風速0.8m/s程度で対策できる

部品名称	ピン数 又は 形状種別	チップ 温度上限 ()	ケース 温度上限 ()	外形寸法(mm)			消費 電力 W	R j c /W	部品 放射 率	追加 表面 積	面積拡 大率	風速 m/S	部品周囲 空気温度 上昇低減 率 (0~1)	部品単体温度上昇		部品単体 温度マージン		機器実装時 温度マージン	
				縦 又は直径	横	高さ								ケース	チップ	ケース	チップ	ケース	チップ
IC1	80	100	90	20.8	20.8	3.3	0.62	2	0.8	0	1	0.8	1	13.72	14.96	31.28	40.04	11.28	20.04
IC2	128	100	90	18	18	2	0.38	1.7	0.8	0	1	0.8	1	11.10	11.75	33.90	43.25	13.90	23.25
IC3	24	125	110	4.8	30	15	0.6	3.7	0.8	0	1	0.8	1	10.06	12.28	54.94	67.72	34.94	47.72
IC4	8	125	110	9	9	1.4	0.6	1.2	0.8	0	1	0.8	1	38.92	39.64	26.08	40.36	6.08	20.36
IC5	257	100	90	35	35	2.3	2.2	1.1	0.8	0	1	0.8	1	24.42	26.84	20.58	28.16	0.58	8.16

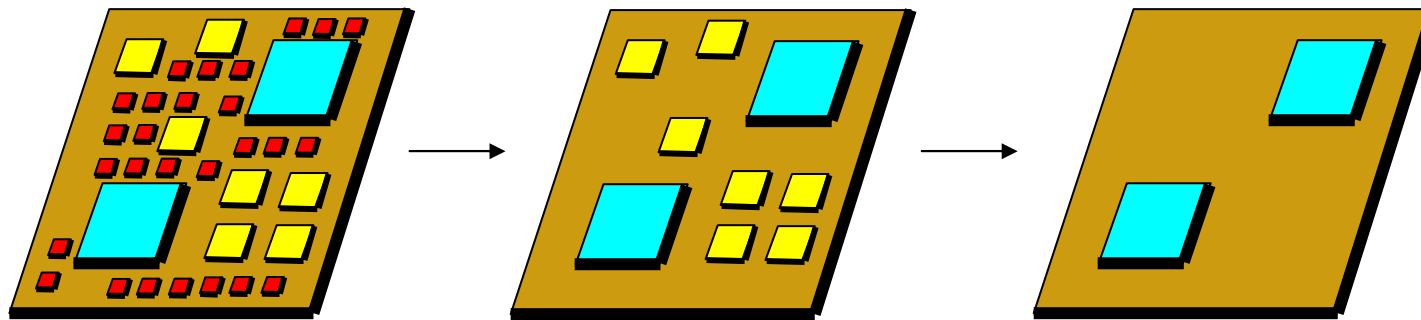
周囲温度低減 IC4、IC5を下方(風上側)に配置することで可能性あり

部品名称	ピン数 又は 形状種別	チップ 温度上限 ()	ケース 温度上限 ()	外形寸法(mm)			消費 電力 W	R j c /W	部品 放射 率	追加 表面 積	面積拡 大率	風速 m/S	部品周囲 空気温度 上昇低減 率 (0~1)	部品単体温度上昇		部品単体 温度マージン		機器実装時 温度マージン	
				縦 又は直径	横	高さ								ケース	チップ	ケース	チップ	ケース	チップ
IC1	80	100	90	20.8	20.8	3.3	0.62	2	0.8	0	1	0	1	23.75	24.99	21.25	30.01	1.25	10.01
IC2	128	100	90	18	18	2	0.38	1.7	0.8	0	1	0	1	19.95	20.60	25.05	34.40	5.05	14.40
IC3	24	125	110	4.8	30	15	0.6	3.7	0.8	0	1	0	1	23.62	25.84	41.38	54.16	21.38	34.16
IC4	8	125	110	9	9	1.4	0.6	1.2	0.8	0	1	0	0.2	59.25	59.97	5.75	20.03	1.75	16.03
IC5	257	100	90	35	35	2.3	2.2	1.1	0.8	0	1	0	0.2	38.32	40.74	6.68	14.26	2.68	10.26

5. 熱設計プロセス(3) シミュレーション活用

★温度マージンの小さいもの、熱流束の大きい部品をモデル化する

よく「大きめの部品を残して小さい部品は省略する」ことをやってしまうが、これは最悪の選択である。表面積の小さい部品は熱的に厳しいことが多い



熱的に厳しい部品、流れに影響の大きい部品を残し、それ以外の部品を省略する

◆熱的に厳しい部品＝表面熱流束が大きい部品

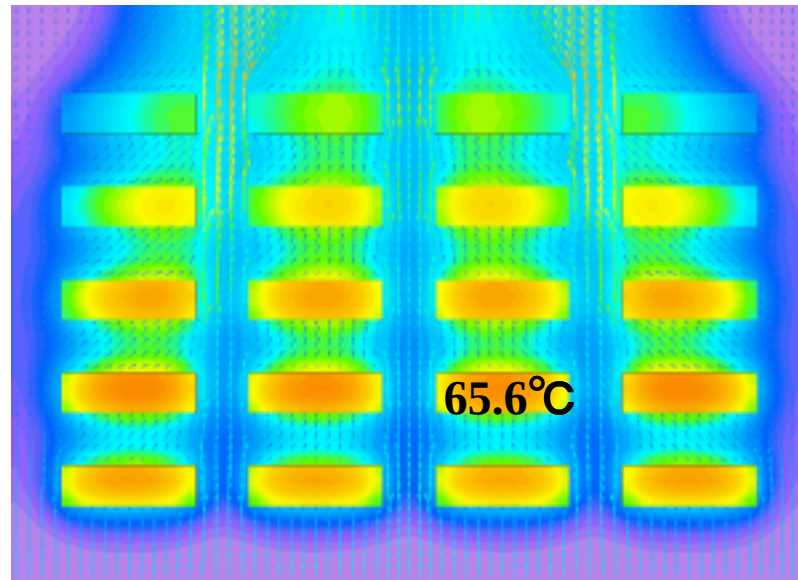
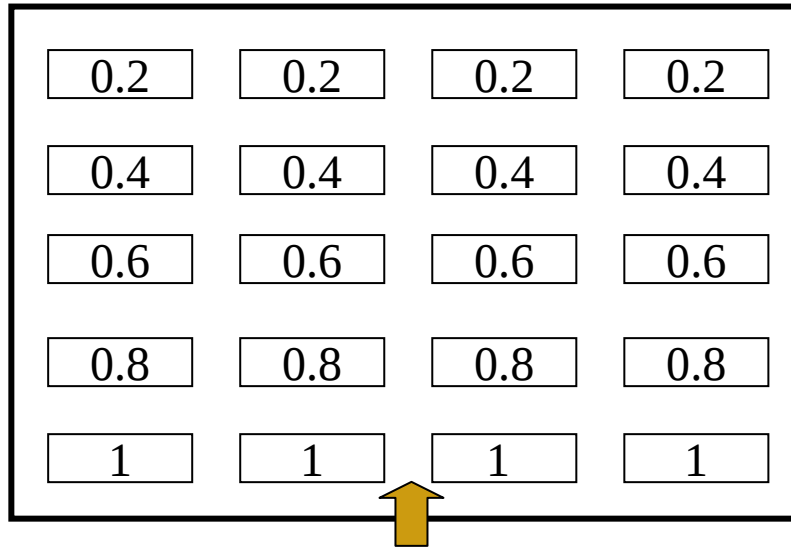
$$\text{表面熱流束} = \text{消費電力} / \text{表面積}$$

◆流れに影響の大きい部品＝流路の障害となる部品

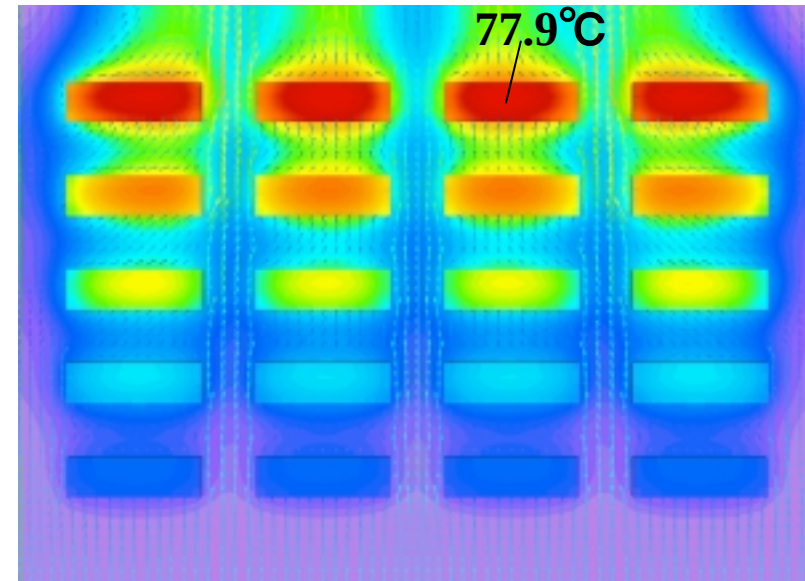
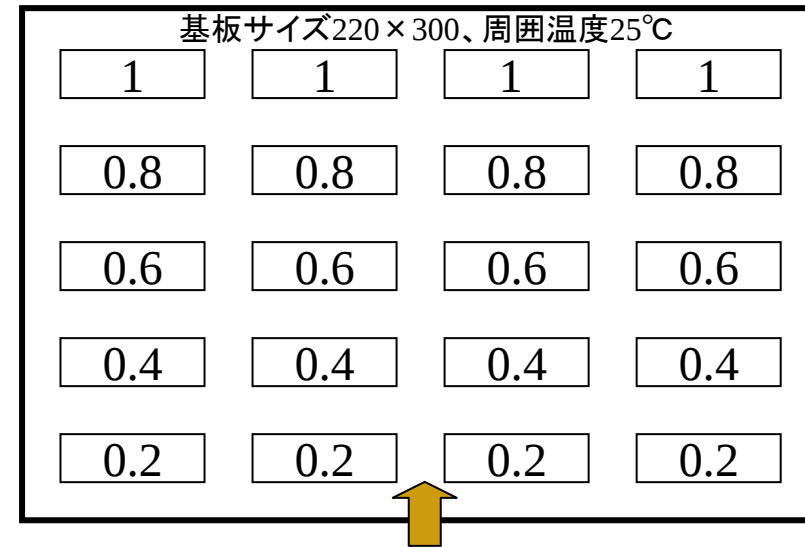
通風孔を塞ぐ、ファンの流れを妨げる・・・

5. 熱設計プロセス(3) 相対比較に使用する

- 対策検討段階では、絶対温度の追求よりも相対比較中心で使用する。
温度マージンの少ないものを熱伝達率の大きい場所に配置することによる温度降下等



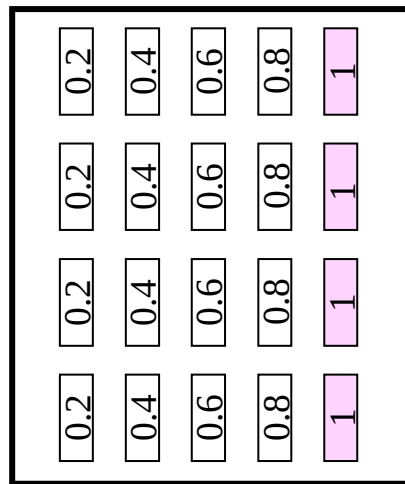
(a)消費電力の大きい部品を下方に配置



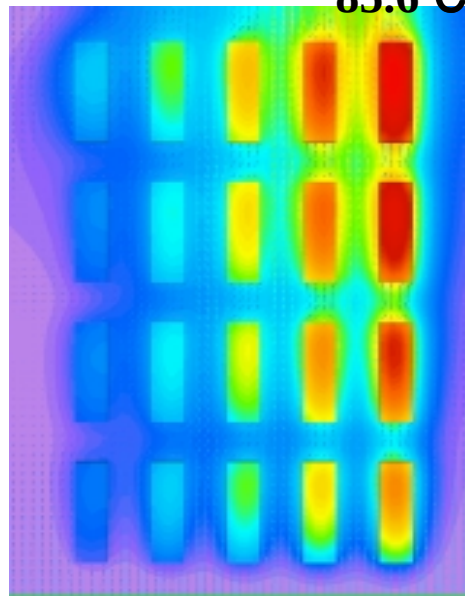
(b)消費電力の大きい部品を上方に配置

5. 熱設計プロセス(3) 部品相互影響の把握

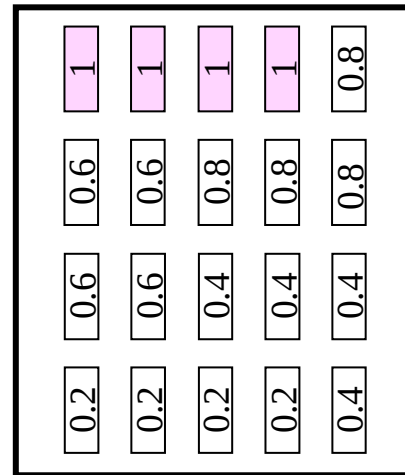
- 部品の相互影響による温度差異をシミュレーションで把握する



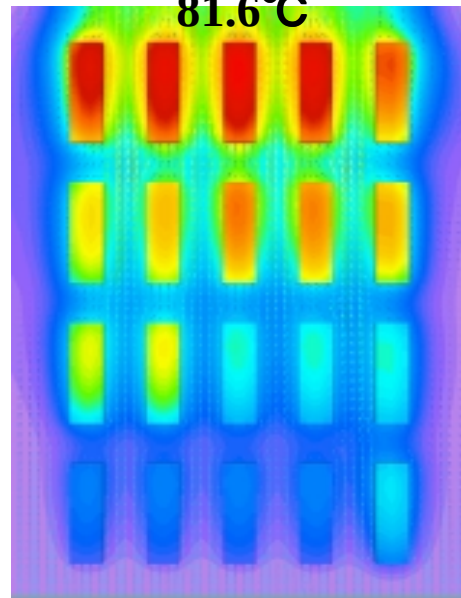
85.6°C



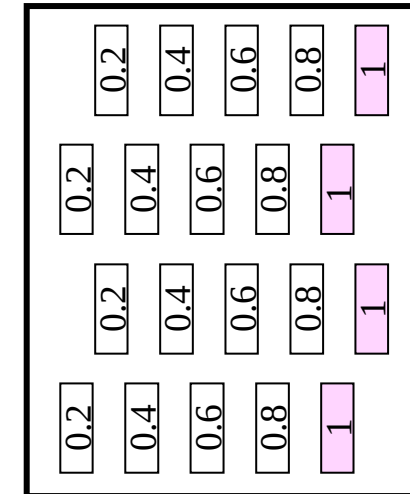
(a) 発熱量の大きい部品を流れの方向に直線状に配置した場合



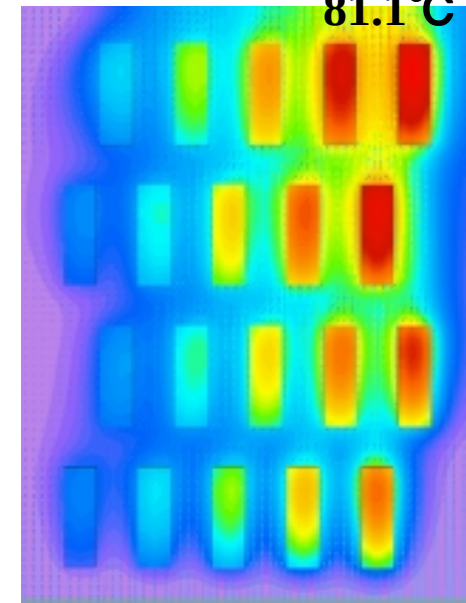
81.6°C



(b) 発熱量の大きい部品を流れに直交する方向に直線状に配置した場合(風下に配置)



81.1°C

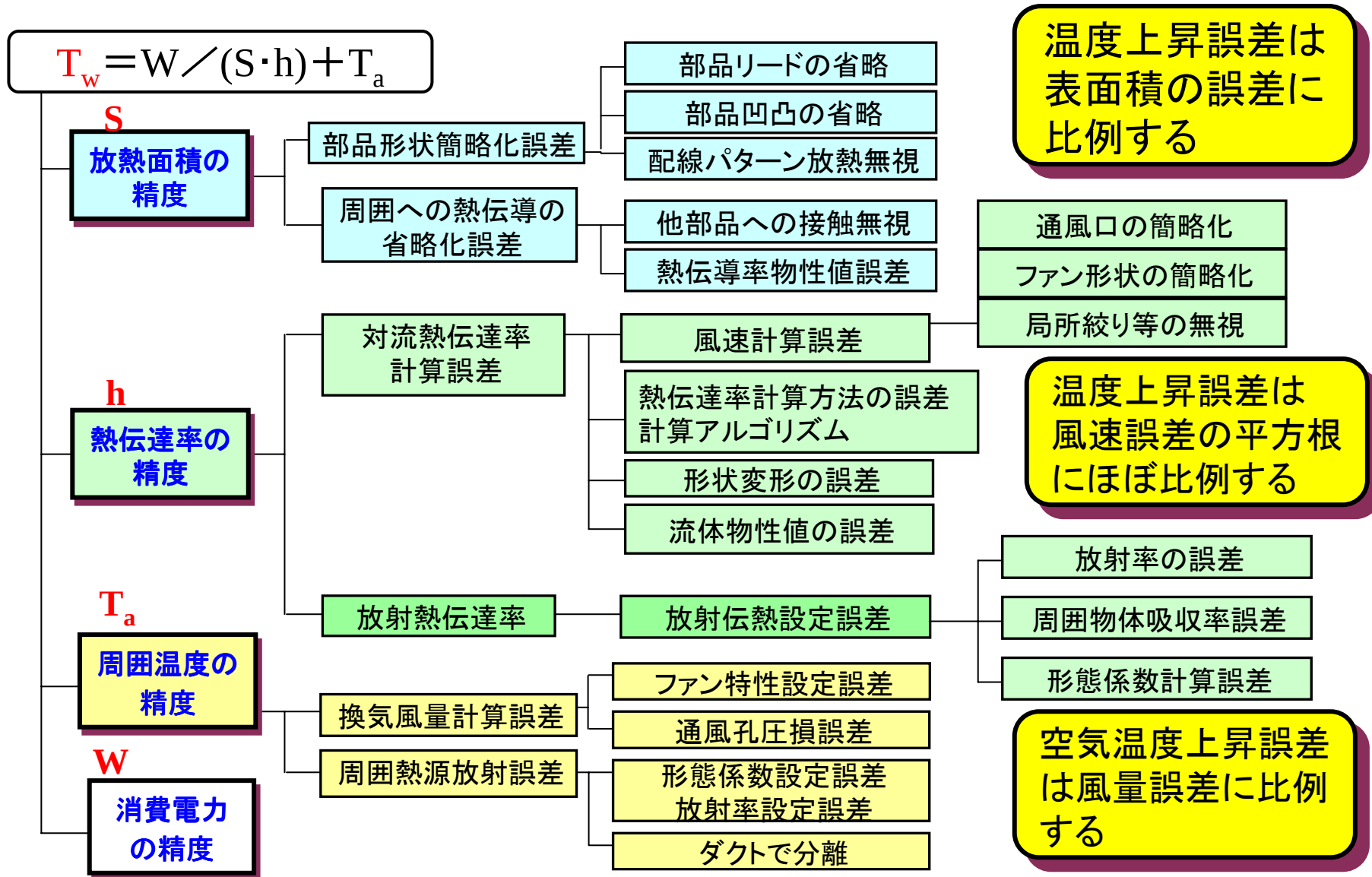


(c) 発熱量の大きい部品を千鳥配置にする

6. シミュレーション精度を高める

誤差の因果関係

精度の因果関係を把握し、影響の大きい誤差を抑える工夫が必要



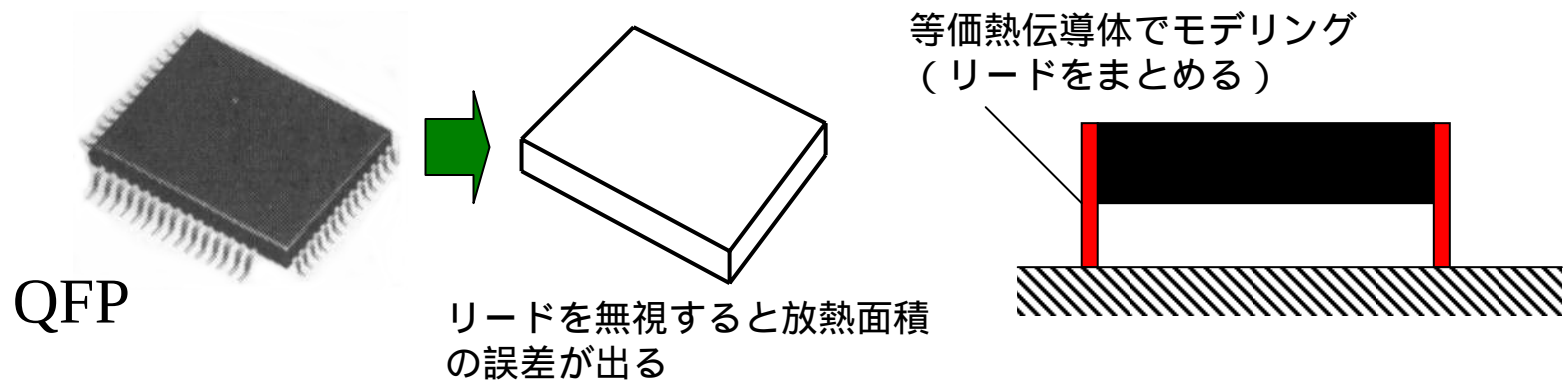
6. シミュレーション精度を高める

部品リードのモデル化

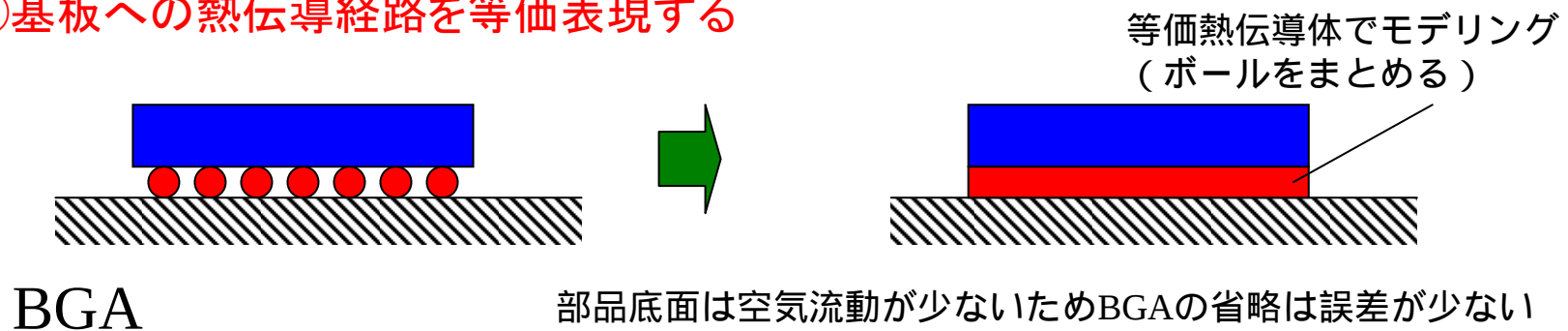
部品のモデル化(1) 放熱面積の精度を保つ

①表面積の誤差を抑えたモデリングを行う

QFPなどで、単純にリードを省略してしまうと、表面積の誤差(5~20%)を生じ、温度が高めになる要因となる。精度を求めるならばリードを等価熱伝導率を持つ異方性材料でモデル化する。



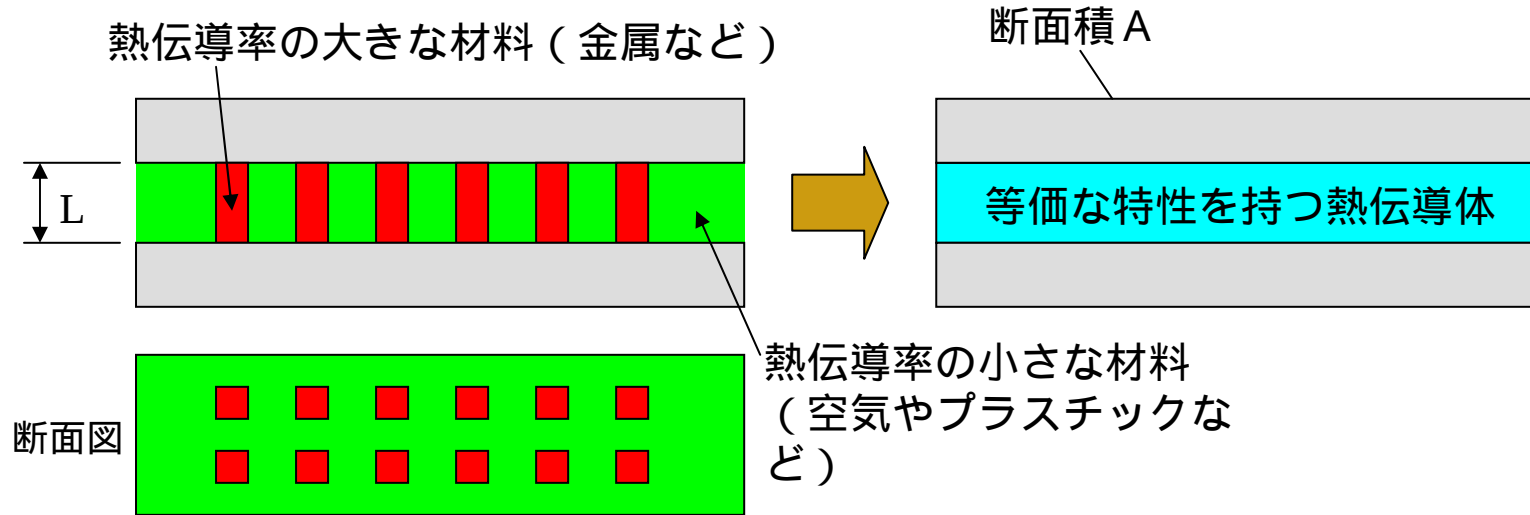
②基板への熱伝導経路を等価表現する



6. シミュレーション精度を高める 異方性等価熱伝導ブロック

異方性の等価熱伝導率を持つ熱伝導体に置き換える

例) BGAの半田ボール、プリント基板の配線パターン、サーマルビア、部品リード、金線ワイヤ



【熱伝導体の等価熱伝導率の計算】

■ 熱伝導率の大きな材料がつながっている方向

$$\text{等価熱伝導率 } k_e = (A_1 \cdot k_1 + A_2 \cdot k_2) / A$$

A_1 、 A_2 ：熱伝導率の大きい部分と小さい部分のそれぞれの断面積合計

k_1 、 k_2 ：熱伝導率の大きい材料と小さい材料のそれぞれの熱伝導率

A ：エリア全体の断面積（ $= A_1 + A_2$ ）

■ 熱伝導率の大きな材料がつながっていない方向 熱伝導率の小さな材料の熱伝導率

FLOTHERMでは、PCBの等価熱伝導率などの自動計算機能を持っている

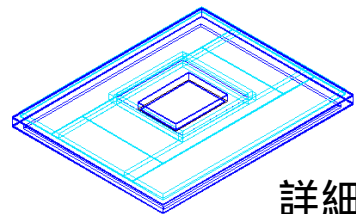
6. シミュレーション精度を高める 電子部品内部のモデル化

部品のモデル化(2)

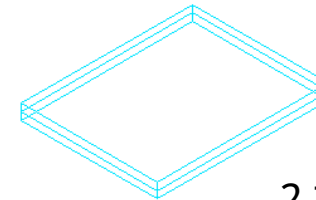
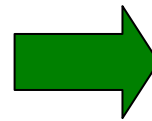
FLOTHERMでは、FLOPACKを使って部品パッケージを自動的にモデル化できる

②部品内部は、 θ_{jc} で表現する

部品の内部構造はモデル化できないことが多いため、表面温度から θ_{jc} でチップ温度を推定する。



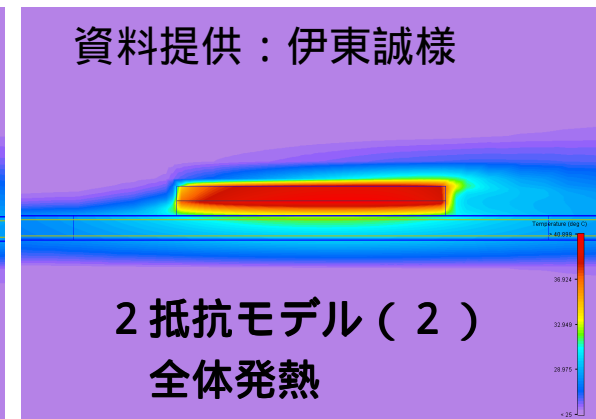
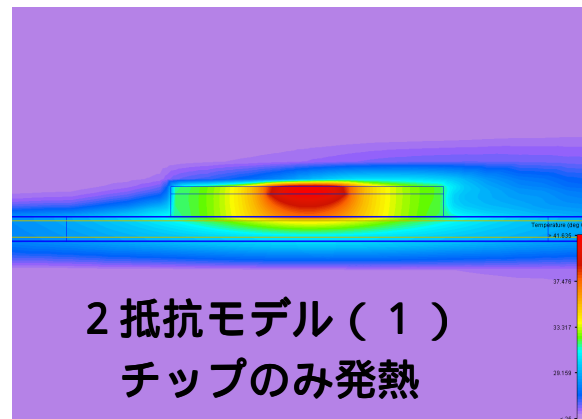
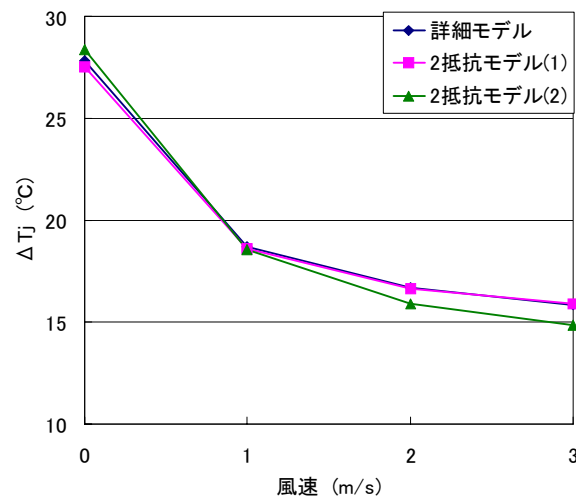
詳細モデル



2 抵抗等価モデル

③チップ部分もしくはリードフレーム部に発熱を与える。

チップサイズが分かれば、チップ部分に体積発熱を与える。全体を均一発熱にしてもよいが、風速が大きい場合には誤差が出る



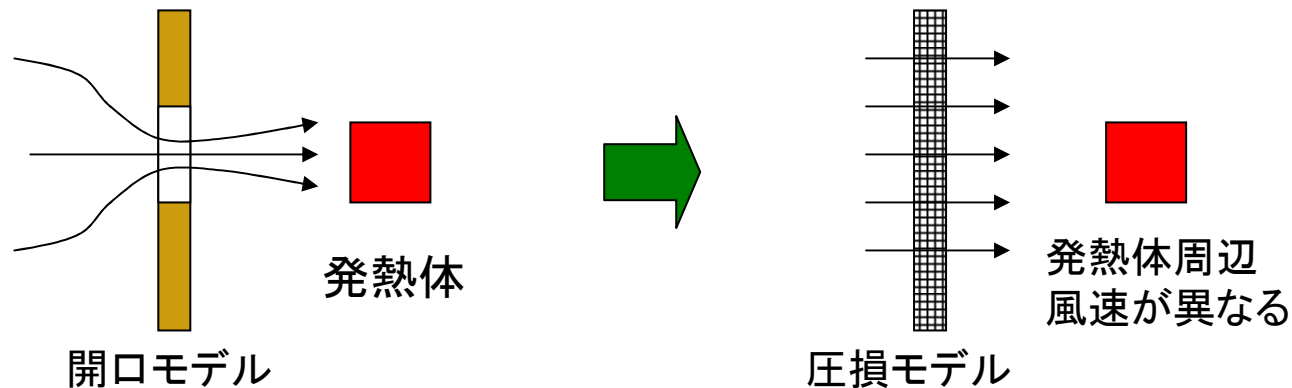
資料提供：伊東誠様

6. シミュレーション精度を高める 通風孔のモデル化

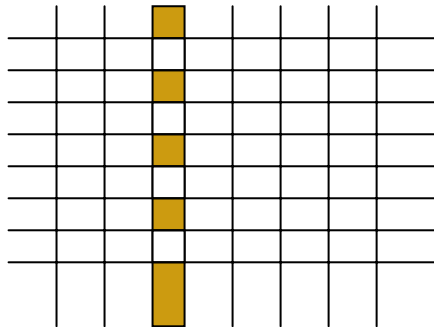
通風孔のモデル化

通風口の風速で部品を冷却する場合は圧損係数を使用しない

通風口を等価な圧損係数（流体抵抗）に置き換えると、通風孔近傍の風速や流れの状態は現実と異なる。突入風速で部品を冷却するような場合には通風孔の形状表現が必要である



小さな穴が領域全体に分散するような場合は、近傍の風速は平均化されるため、圧損係数で表現した方がよい。穴を粗く分割するとむしろ計算精度が低下する。



6. シミュレーション精度を高める プリント基板のモデル化

プリント基板のモデル化

FLOTHERMではPCBのモデル化を使用する

プリント基板は異方性等価熱伝導体で表現する

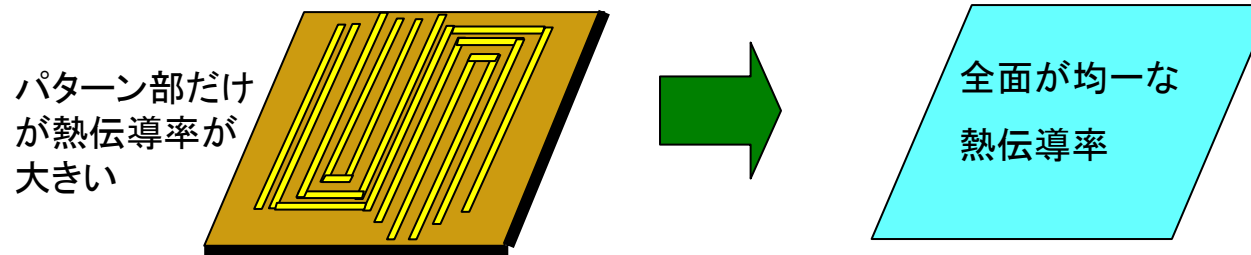
プリント基板は最低限「異方性等価熱伝導体」として表現する。広がり方向の等価熱伝導率は以下の式で計算する。厚み方向の熱伝導率は、サーマルビアがなければ基材の熱伝導率と同じとしてよい。サーマルビアがある場合は、厚み方向の熱伝導率を等価熱伝導体の考え方で計算する。

$$\text{等価熱伝導率 } k_e = (A1 \cdot k1 \cdot \text{銅箔残存率} + A2 \cdot k2) / A$$

A1、A2：銅箔部分と基材部分のそれぞれの層の断面積合計（層厚×幅）

k1、k2：銅箔と基材のそれぞれの熱伝導率

A：基板の総断面積（= A1 + A2）= 板厚×幅



小型部品で精度を追求する場合は配線パターンをモデル化する

現実には配線パターンに方向があるため、面方向も異方性が強い。PCBを面内等方性で表現すると誤差を生じる場合がある。



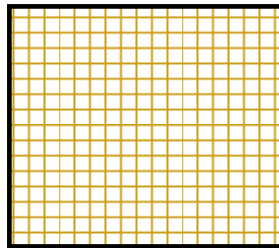
小型部品では配線パターンもモデル化

6. シミュレーション精度を高める ファンのモデル化

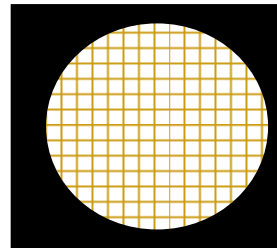
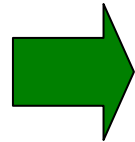
ファンのモデル化

ファン近くに部品がある場合は、ファン形状を正確に表現する

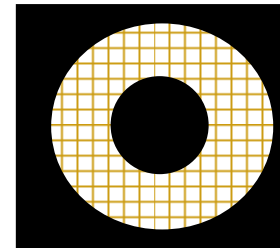
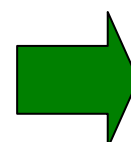
ファン近く(特に吐出口)の風速はファンのモデルによって大きく異なる。温度を正確に求めたい部品がファンの吐出口近く(150mm以内)にある場合には、風速精度を上げるため吐出断面積を忠実にモデル化しなければならない。



× 全面吐き出し
(風速小)



△円形断面
(風速まだ小)



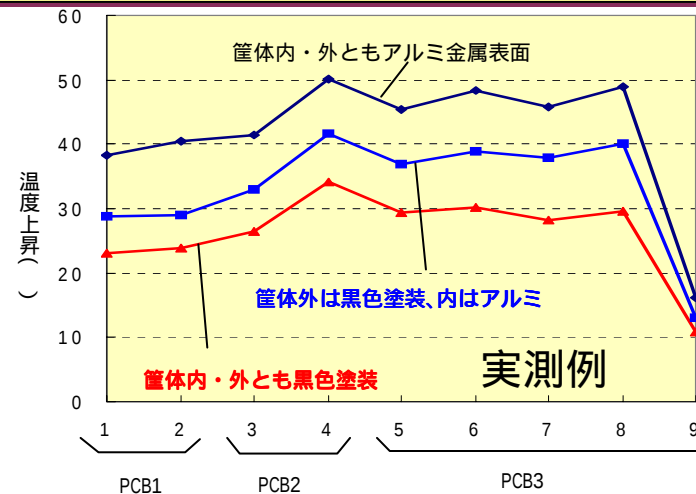
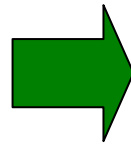
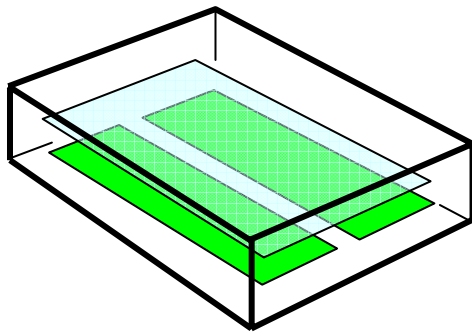
○モータ軸考慮
(風速正確)

6. シミュレーション精度を高める 筐体のモデル化

筐体外表面・内表面の放射(輻射)の考慮

自然空冷機器では放射伝熱の考慮が不可欠

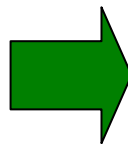
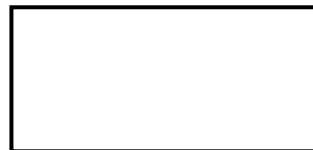
自然空冷機器では、筐体内部の部品－筐体間の熱交換や筐体外表面の放射伝熱の比率が大きいため、精度を求める場合は放射の考慮が不可欠となる



筐体の熱伝導の考慮

筐体を放熱に使用する場合は筐体の面方向の熱伝導を考慮したモデルとする

筐体に部品を接触させるなど、筐体を熱を伝えて放熱に使用する場合には筐体の面方向の熱伝導を考慮する必要がある。一般的なWallは、厚み方向の熱伝導だけしか計算しない場合があるので注意が必要



まとめ

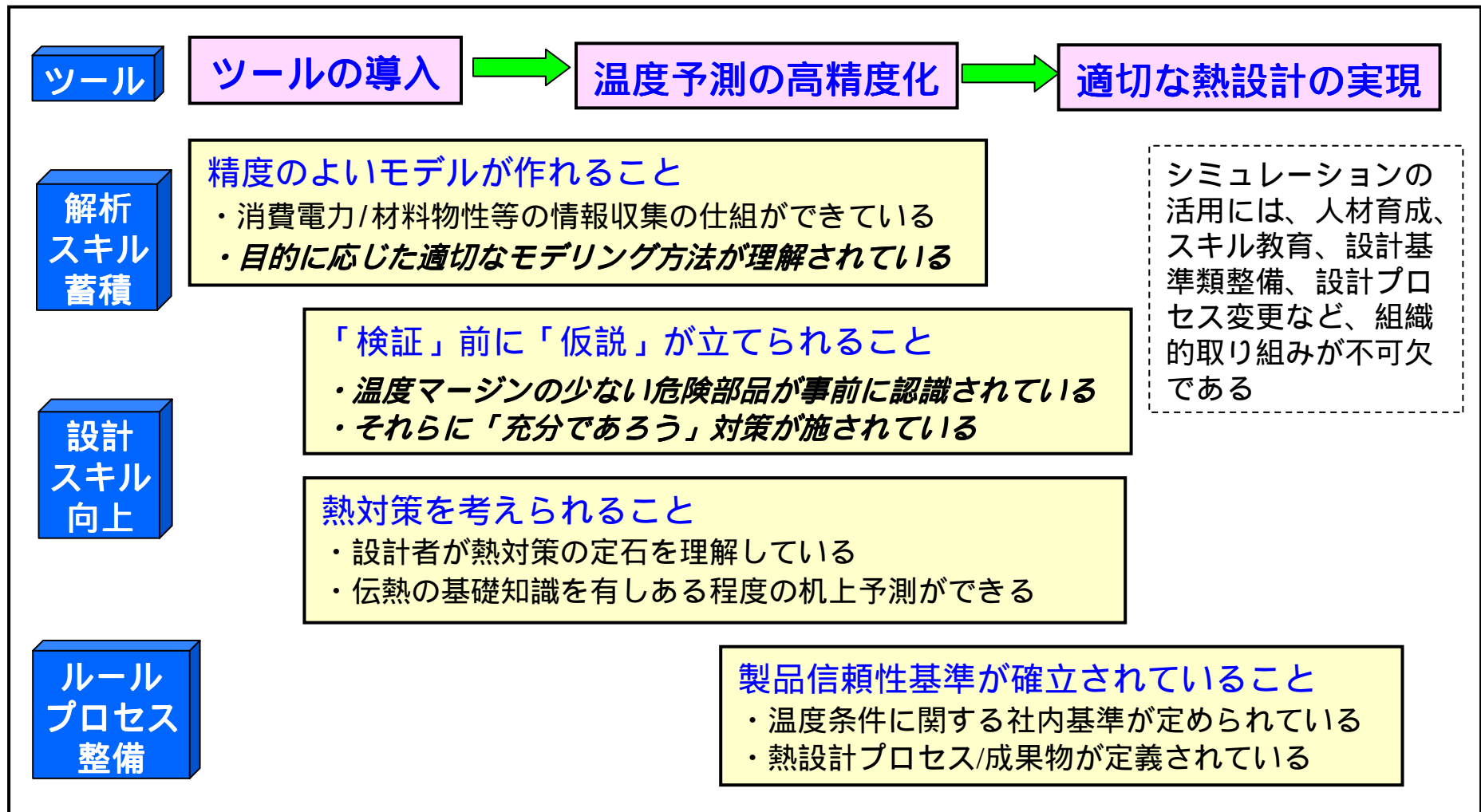
シミュレーションの導入 ≠ 温度が正確に予測できる ≠ 適切な熱設計ができる

シミュレーション活用の3条件

設計上流段階で熱対策が織り込まれている

検証すべき部位が明確になっている

解析結果可否判断基準が明確になっている



【参考文献・資料】

- 1)伊藤謹司、国峰尚樹:トラブルをさけるための電子機器の熱対策設計第2版、
日刊工業新聞社(2006年9月)
- 2)国峰尚樹:エレクトロニクスのための熱設計完全入門、日刊工業新聞社(1997年)
- 3)伊藤謹司(オフィス・ジェーアイ):熱設計何でも相談室(ホームページ)資料
<http://www.thermo-clinic.com>
- 4)伊藤謹司(オフィス・ジェーアイ):熱設計ソフト Thermocalc V12.3
- 5)伊藤謹司(オフィス・ジェーアイ):熱回路網法ソフト Nodalnet V3.5
- 6)国峰尚樹:電子機器の放熱問題を解決する熱対策計算とシミュレーション技術
技術情報協会(2006年11月)