

# 第1小委員会（熱制御WG）の説明

富山県立大学 畠山 友行

## メンバー

主査：畠山友行 (富山県立大学)

幹事：中川慎二 (富山県立大学)  
木下貴博 (富山県立大学)

委員：中村元 (防衛大学校)  
結城和久 (山口東京理科大学)  
海野徳幸 (山口東京理科大学)  
西剛伺 (足利大学)  
洪定杓 (鹿児島大学)  
福江高志 (金沢工業大学)  
木伏理沙子 (富山県立大学)

## 研究テーマ

### ・接触熱抵抗予測式の構築

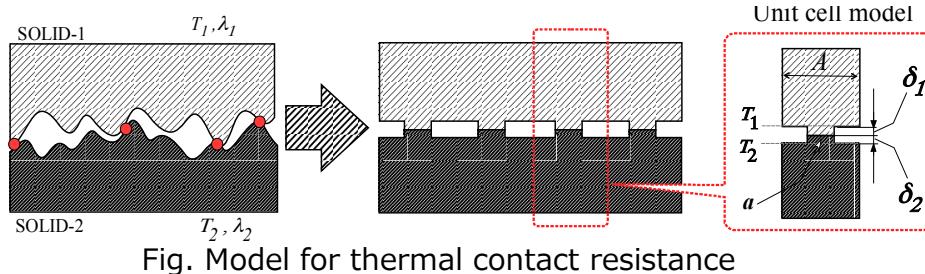


Fig. Model for thermal contact resistance

### 橘・佐野川の式(1)(2)

$$\frac{1}{r_s} = \frac{1}{\frac{\delta_1}{\lambda_1} + \frac{1}{h_0} + \frac{\delta_2}{\lambda_2}} \cdot \frac{a}{A} + \frac{\lambda_f}{\delta_1 + \delta_2} \frac{A-a}{A}$$

rs: 接触熱抵抗 [K/W]  
 z1, z2: 表面粗さ [m]  
 k1, k2: 固体の熱伝導率 [W/m·K]  
 h0: 付加コンダクタンス [kcal/(m<sup>2</sup>·h°C)]  
 λ: 空隙を満たしている物質の熱伝導率[W/m·K]  
 p: 押しつけ圧力 [MPa]  
 H: やわらかい方の固体の固さ

※接触圧力 1 MPa以上

Ref:

(1) 橘 藤雄、日本機械学会誌, Vol.55, No.397, pp.8-13, 1952

(2) 佐野川 好母, 日本機械学会論文集, Vol.33, No.251, pp.1131-1137, 1967

### 定常法を用いた実測によるデータベースの構築

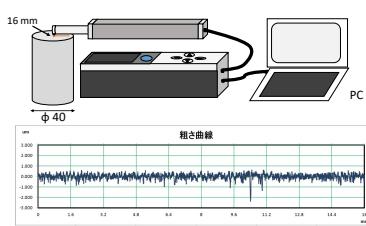


Fig. Roughness measurement

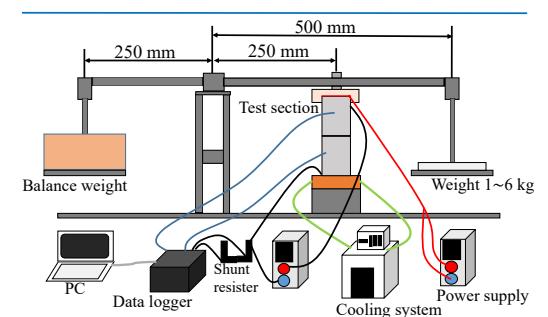


Fig. Experiment for measurement of thermal contact resistance

### ・熱回路網法の高精度化に関する研究

#### 熱回路

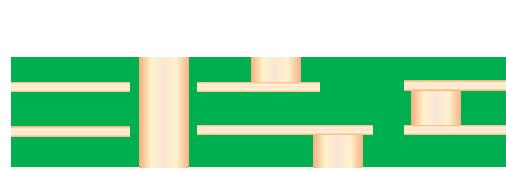


Fig. Circuit board

#### 熱回路

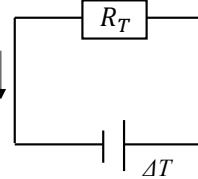


Fig. Thermal network

$$\Delta T = RQ$$

ΔT : 温度差 [K]  
 R<sub>T</sub> : 热抵抗 [K/W]  
 I : 热流 [W]

#### 解析時間の短縮化

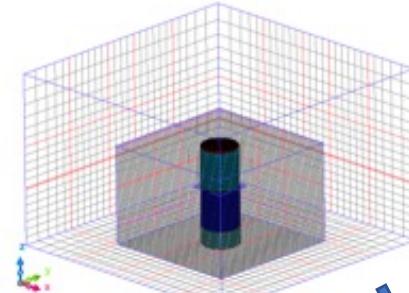


Fig. CFD simulation

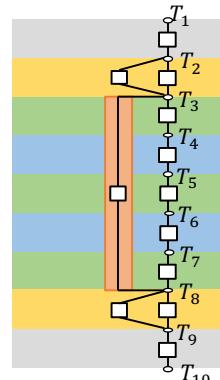


Fig. Thermal network model

#### 熱回路網の組み方の指針を示す

# 熱WG: 木伏理沙子 (富山県立大学)

## 研究テーマ

- ・パワー半導体用TIM（接合材）の熱抵抗評価

Ref:

(1) 木伏理沙子, J. HTSJ, Vol. 59, No. 246, 2020

TOYA  
Prefe  
Unive

定常法を用いた実測による熱抵抗評価

フーリエの法則

$$q = -\lambda \frac{\partial T}{\partial x}$$

$q$  : 热流束 [W/m<sup>2</sup>]  
 $\lambda$  : 热伝導率[W/(m·K)]  
 $T$  : 温度 [K]  
 $x$  : 位置 [m]

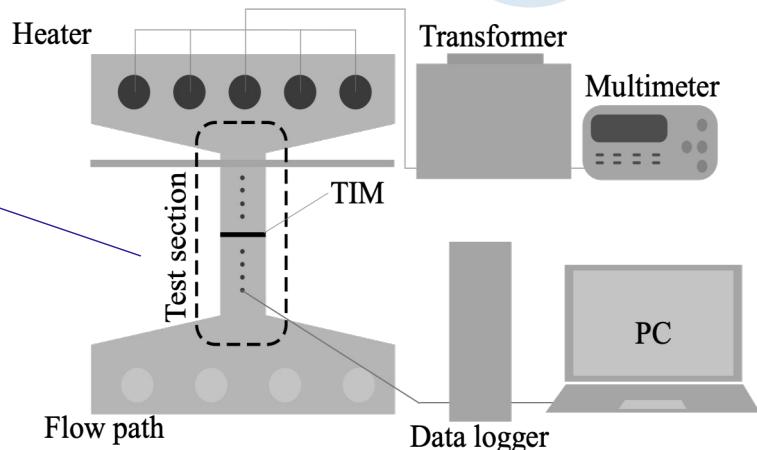
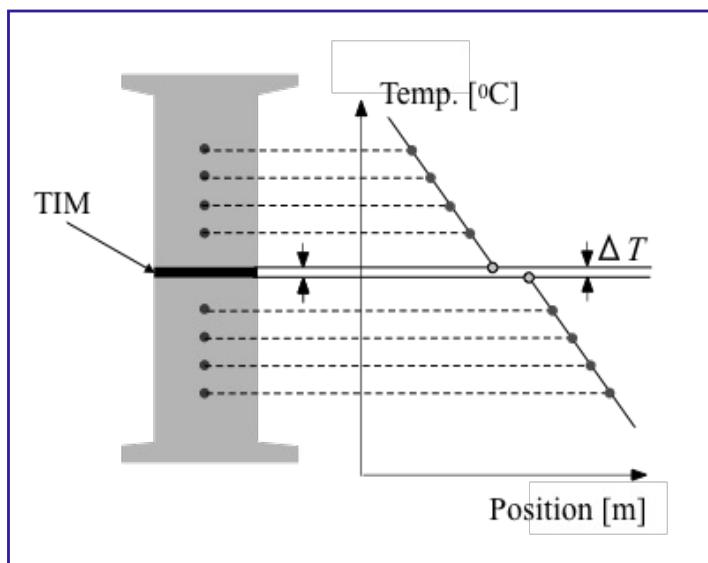


Fig. Model for thermal contact resistance <sup>(1)</sup>

不均一材料に適した定常法により、  
パワー半導体をターゲットにした高熱流束・高温条件での評価を実施

# 熱WG: 木伏理沙子 (富山県立大学)

## 研究テーマ

- ・パワー半導体デバイスにおける高性能熱設計手法の開発

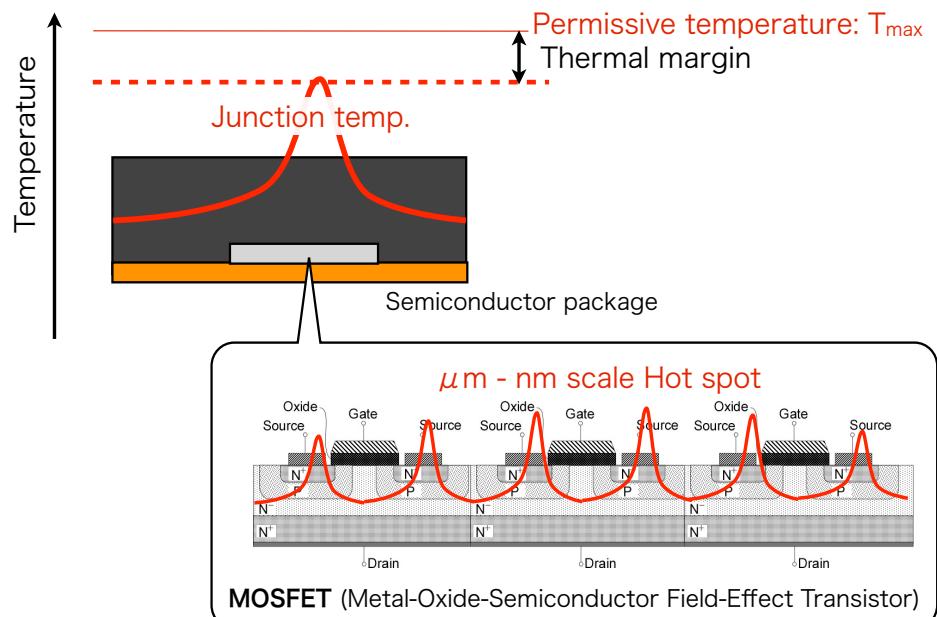


Fig. Micro/nano scale hot spot in power device

Ref:  
(2) R. kibushi, Transaction of The Japan Institute of Electronics Packaging, Vol. 6 No. 1, pp. 51-56, 2013

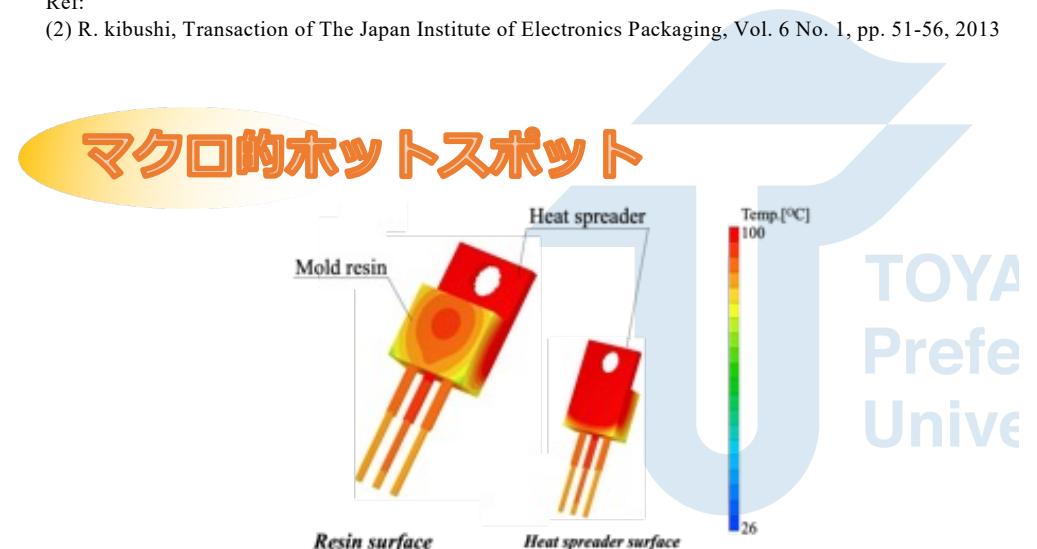


Fig. Macro scale hot spot (CFD simulation)

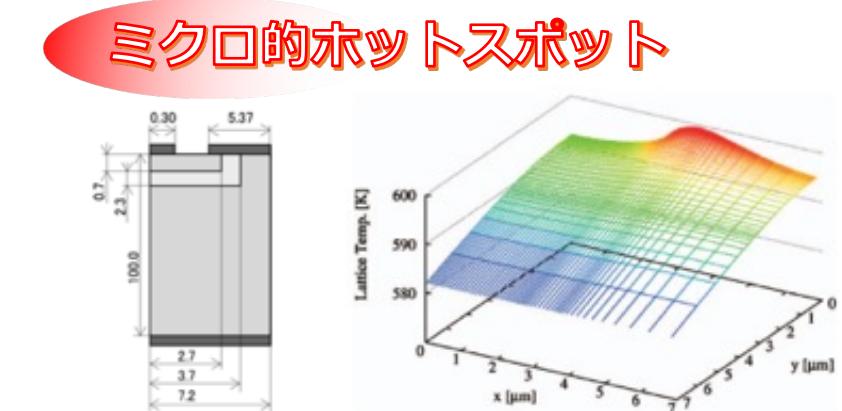


Fig. Micro/nano scale hot spot (Electro-Thermal analysis) <sup>(2)</sup>

ナノ/マイクロサイズおよびマクロ的なホットスポットを考慮した熱設計手法の開発

# はんだ付け工程のCFD シミュレーション

富山県立大学 中川慎二

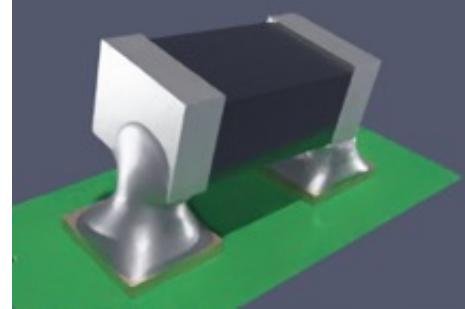
- 熱流体数値シミュレーション（CFD）を活用し、溶融はんだ・周囲気体の熱流動現象を予測する。
- はんだの動きに伴う微小部品の移動を予測する。

# 背景と方法

- 鉛フリーはんだ使用に伴う温度条件の悪化
  - 部品の微細化や実装の高密度化など  
→ 効果的・効率的な不具合対策が必要  
→ シミュレーション技術の活用（予測・原因調査）
- 

- 汎用熱流体解析ソフトウェア
  - オープンソースソフトウェア OpenFOAM
- 取り扱う物理現象
  - 溶融ハンダおよび空気の流動、熱移動
  - 搭載部品の移動
  - 温度による物性値変化（バルク）
  - (予定) 溶融ハンダの溶融・固化（模擬・モデル化）

# 目標



← CFD結果例：  
かたよって初期配置  
された部品のセルフア  
ライメント過程

小型表面実装部品を対象とし、「はんだペースト塗布量・状態」や「マウント状態」が、リフロー工程での部品移動・位置に与える影響を予測できる技術の開発。

はんだペースト→溶融はんだ→固体はんだ の変化を再現する技術の開発。

はんだ結合部の性状を表現するための技術の開発。

計算モデル・設定・コードの共有。

# 次期RC用説明資料

富山県立大学 木下貴博

## 半導体パッケージの 非弾性熱応力シミュレーション

### 構成部品を含んだパッケージ全体構造のモデル化

→ 構成部品を含むPKG全体をモデル化することにより、変形挙動・応力状態の評価を高精度化

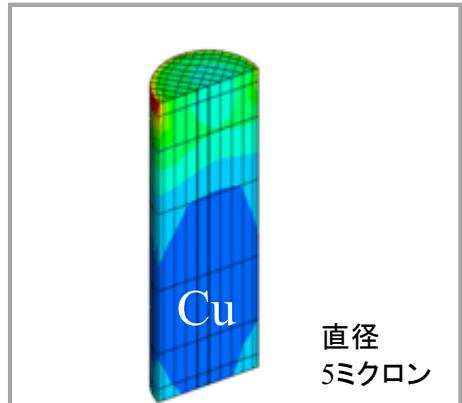
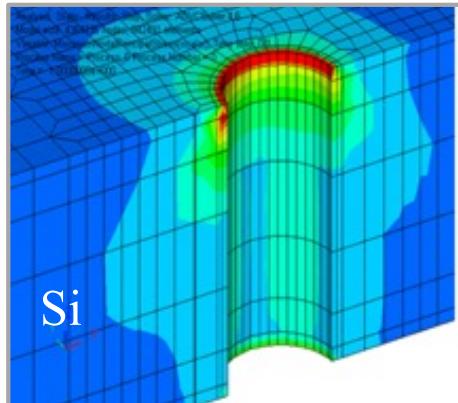
#### 定常・非定常 熱伝導シミュレーション

定 常: リフロー工程・使用環境 etc  
非定常: チップ発熱・ホットスポット etc

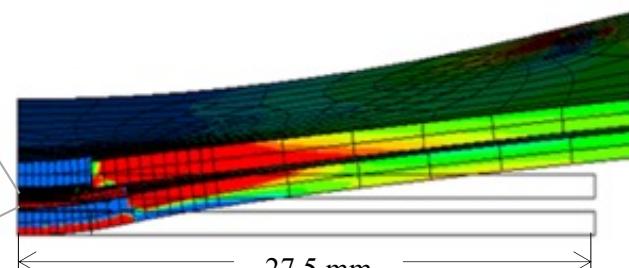
- ・温度分布
- ・プロファイル

#### 弾性・非弾性 熱応力シミュレーション

変形状態・応力状態・疲労寿命の検討  
※弾性: ~1,200万自由度 非弾性: ~800万自由度



シリコン貫通電極(TSV)構造を有する  
半導体パッケージ全体の熱応力シミュレーション



パッケージの反り  
※変形倍率: × 100



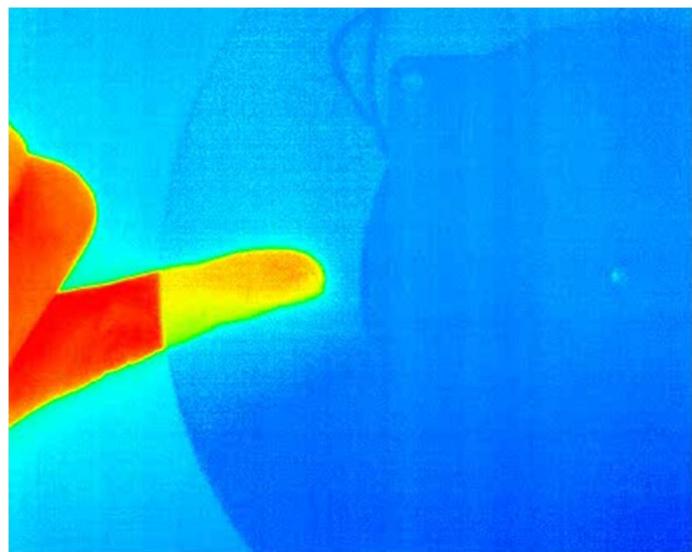
富山県立大学

©Copyright 2021 Materials & Mechanics Laboratories Toyama Prefectural University.

# サーモグラフィによる温度計測技術の高度化（防衛大 中村）

## サーモグラフィの応答補償

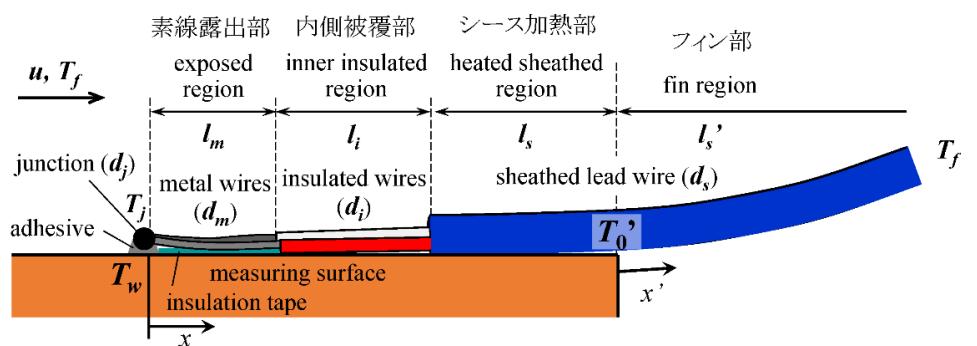
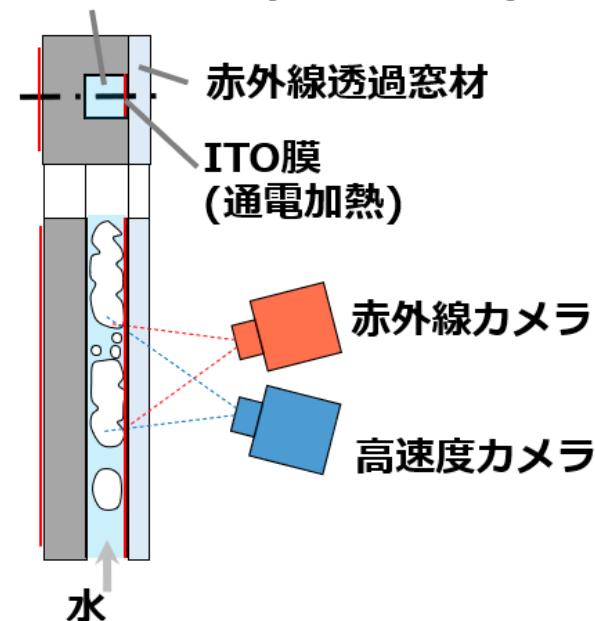
非冷却型サーモグラフィの残像



熱電対などの接触式センサを用いた高精度計測についても研究しています

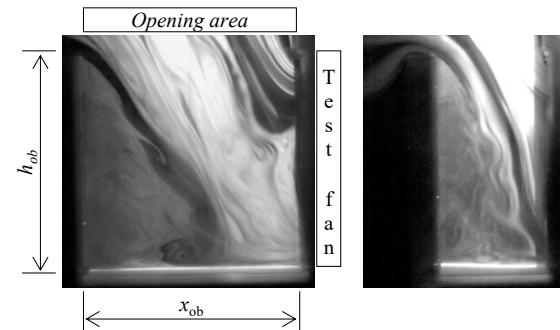
## 沸騰熱伝達の高時空間分解計測

矩形微細流路 (辺長 1-3 mm)

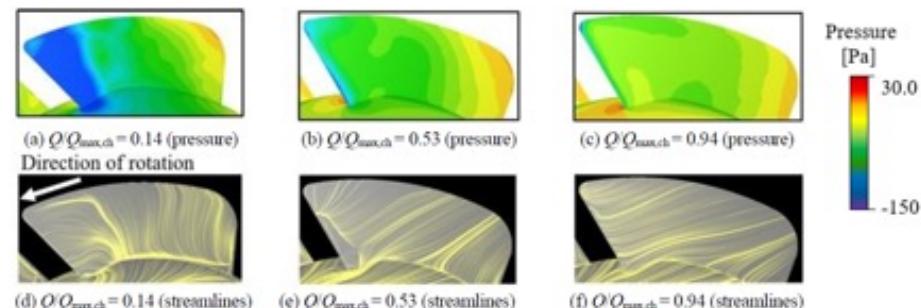


# 研究予定：福江（金沢工業大学）

- 空冷ファンの高密度実装環境下の流れ分析と通風設計指針の提案

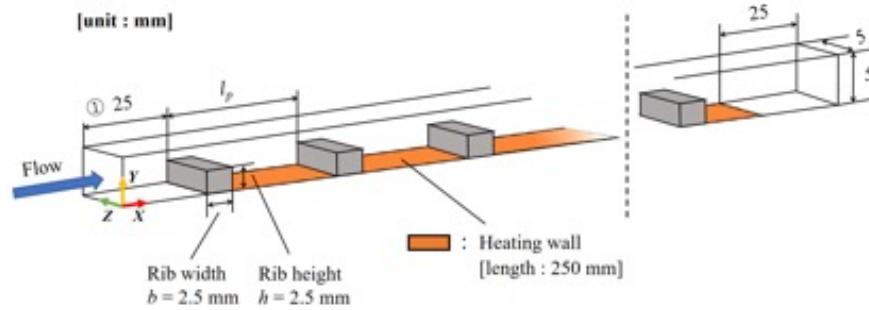


流入側に偏りがある場合のファン性能低下

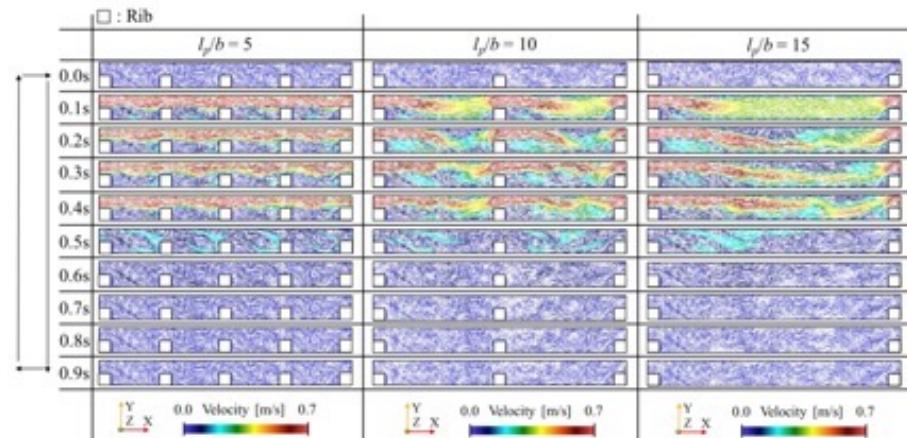


小型ファン内部の流れ場解析と性能低下の原因の可視化

- 脈動流冷却デバイスの機器実装



複数リブの解析モデル



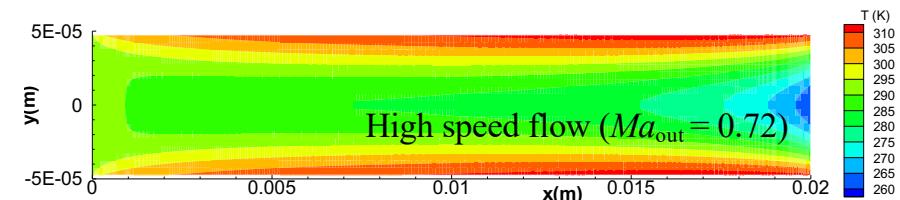
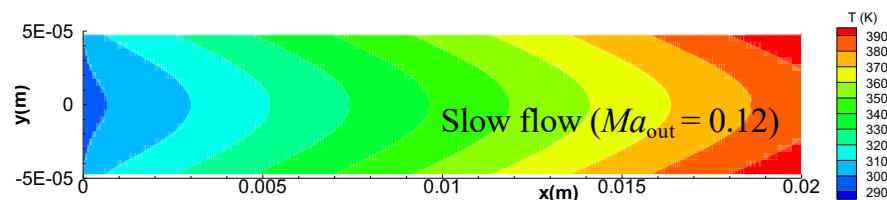
リブピッチを変更した場合の脈動流誘起の様子

# マイクロチャンネルを用いた冷却デバイスの基礎研究

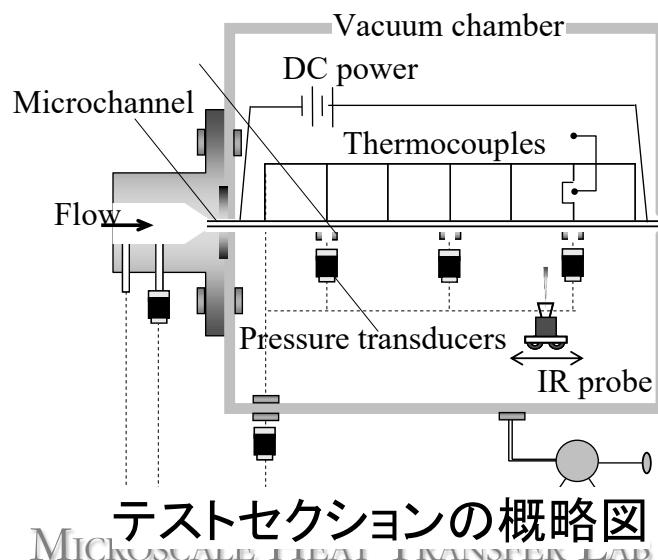
洪 定杓(鹿児島大)

パワー半導体素子の冷却モジュールやマイクロチャンネル熱交換器の設計では、流体輸送装置や運転コスト検討のため圧力損失(管摩擦係数)と伝熱量(熱伝達率)の正確な予測が必要となる。

マイクロチャンネルを用いた冷却デバイスの設計のための基礎研究として、まず単一のマイクロチャンネルガス流の管摩擦係数と熱伝達率の正確な測定と共にそれらに及ぼす因子を解明することが目的である。



一定な熱流束をもつマイクロチャンネルの温度分布 ( $h=100\mu\text{m}$ ,  $L=20\text{mm}$ ,  $\dot{q}_w=1\text{ W/cm}^2$ )  
ストレートマイクロチャンネル( $Ma_{out} \sim 1.2$ )の冷却: 除熱 熱流束  $1 \sim 3\text{ W/cm}^2$



- ・温度回復係数、管摩擦係数、熱伝達率の測定
- ・マイクロチャンネルガス流の流動・熱伝達特性の予測
- ・マイクロチャンネルの冷却性能を数値計算との比較・評価

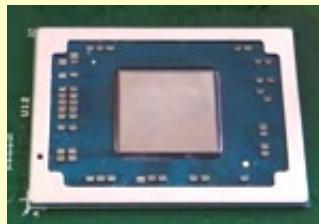
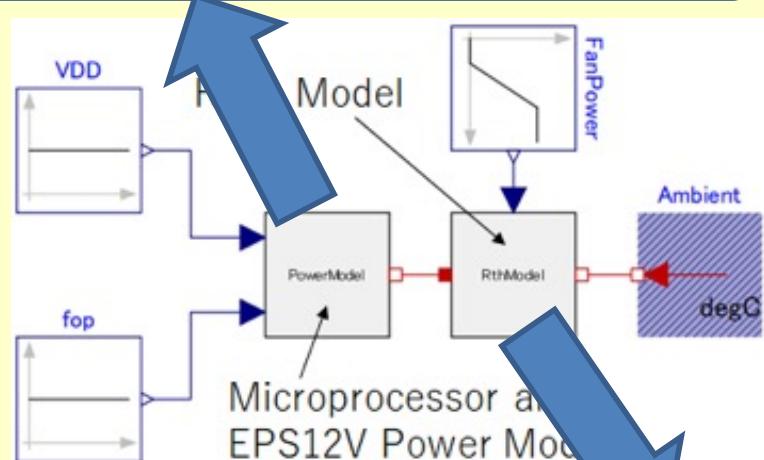
マイクロチャンネルを用いた  
冷却デバイスの提案

# 1D CAEによるマルチドメイン解析

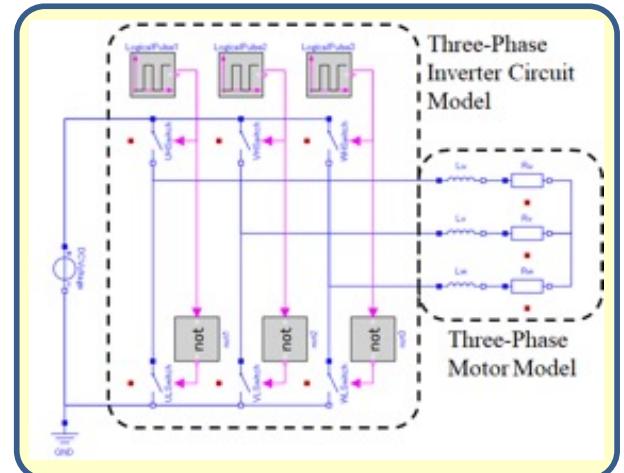
機器の小型化・省エネ化に向けた電気－熱連成解析を実施.  
目的に合わせたモデルの作成からシステムレベルの検証まで実施.

消費電力モデル

$$Power = aC_{load}V_{DD}^2f_{op} + I_{leak}V_{DD}$$

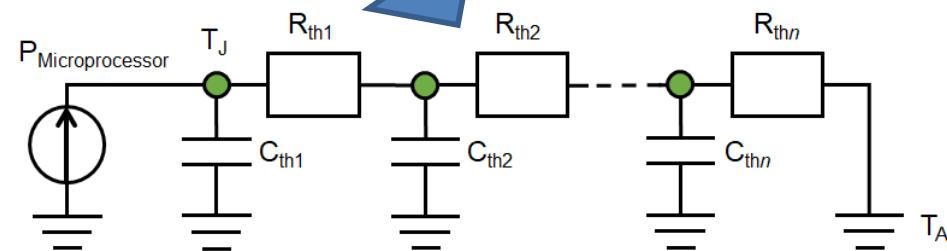


←コンピュータシステムの  
電力－熱連成モデル例



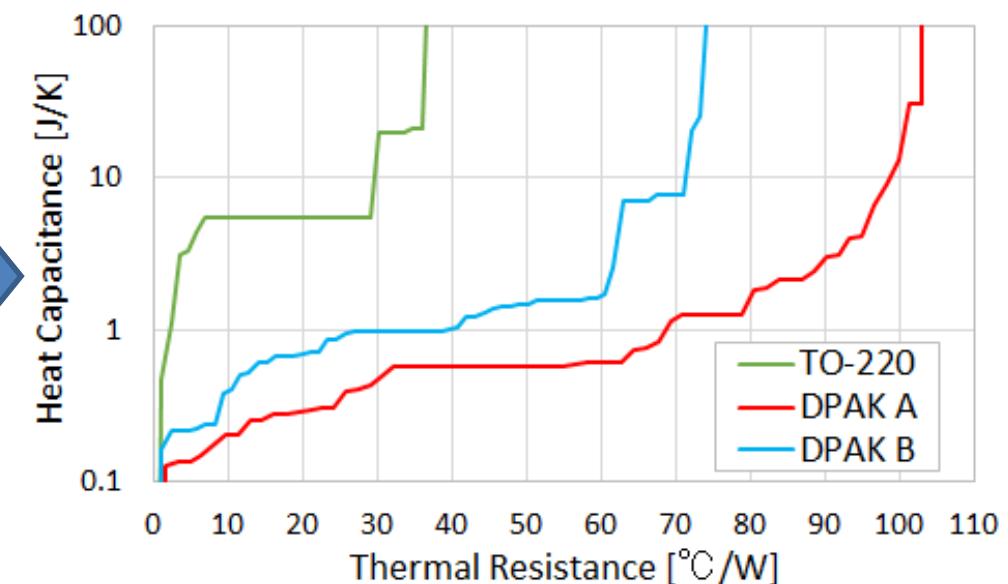
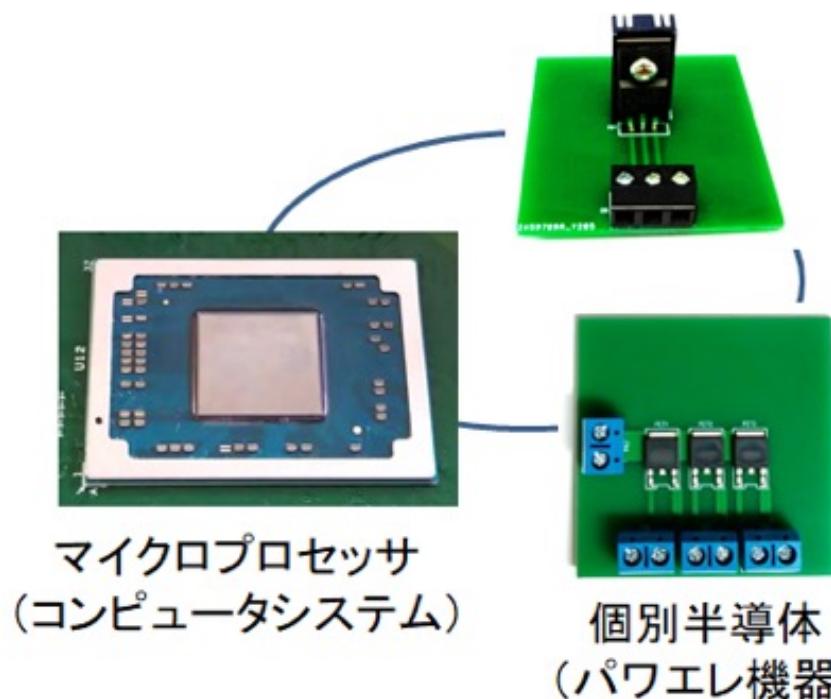
↑ 理想スイッチによる  
インバータ回路モデル例

実施: 足利大学西研究室



# 熱インピーダンス測定に関する研究

コンピュータ機器やパワーエレクトロニクス機器の伝熱経路を実測結果から熱インピーダンス分布として表現し、放熱経路のボトルネックの可視化、最適化を行う。



熱インピーダンス分布

実施：足利大学西研究室

# ロータス金属で発現する 呼吸現象を用いた 空冷技術および沸騰浸漬冷却

山陽小野田市立 山口東京理科大学

結城 和久

# ロータス型ポーラス金属

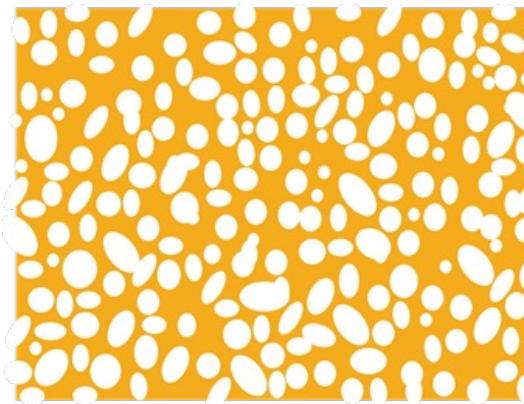


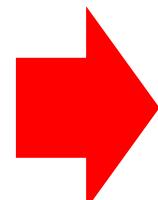
Fig.ロータス型ポーラス金属イメージ



Fig. ロータス型ポーラス金属

## 特徴

- ・一方向性の気孔
- ・気孔率を制御可
- ・機械加工を利用しない
- ・高い熱伝導性



高い量産性

# ロータス波状フィンを用いた新しい空冷技術

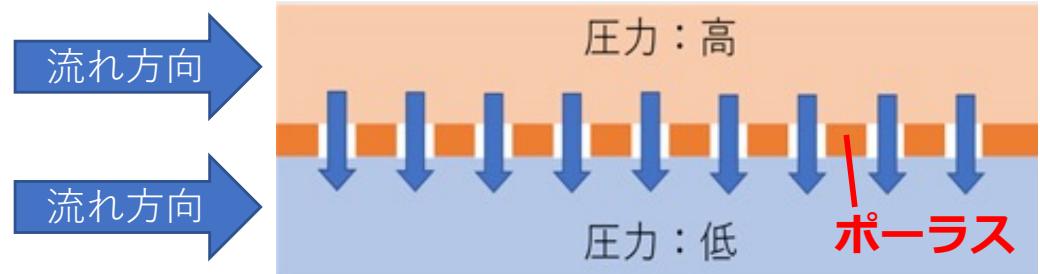


Fig. 呼吸効果イメージ

## 原理

- ・伝熱面積の拡大効果
- ・流路間圧力差による**通過流**発生
- ・複合効果による熱輸送促進

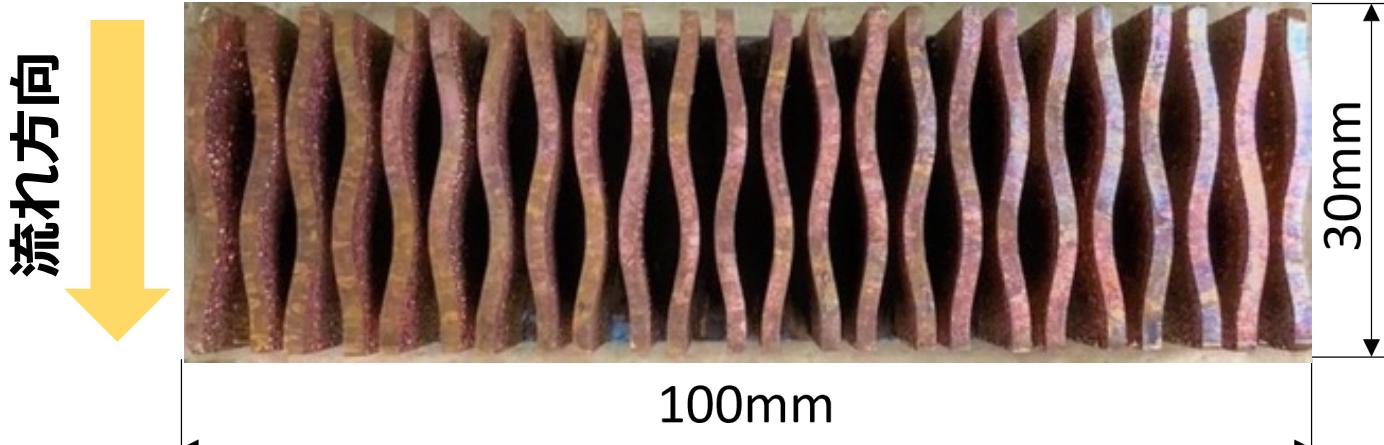


Fig. ロータスフィン上面



有効気孔径: 0.53mm  
気孔面積率: 0.19

- 通常フィンと比較して**1.4倍**向上の伝熱促進
- 更に80%の軽量化が可能

# ロータス体を用いた沸騰浸漬型・自己冷却技術

- 蒸気排出グループを併用することで蒸気排出に伴う自発液供給を助長  
一方向の液供給・蒸気排出（二つのブリージングモードが可能）
- 高透過性能のロータス銅が最適
  - ・ 毛細管力不要 → 従来の常識・技術と逆行

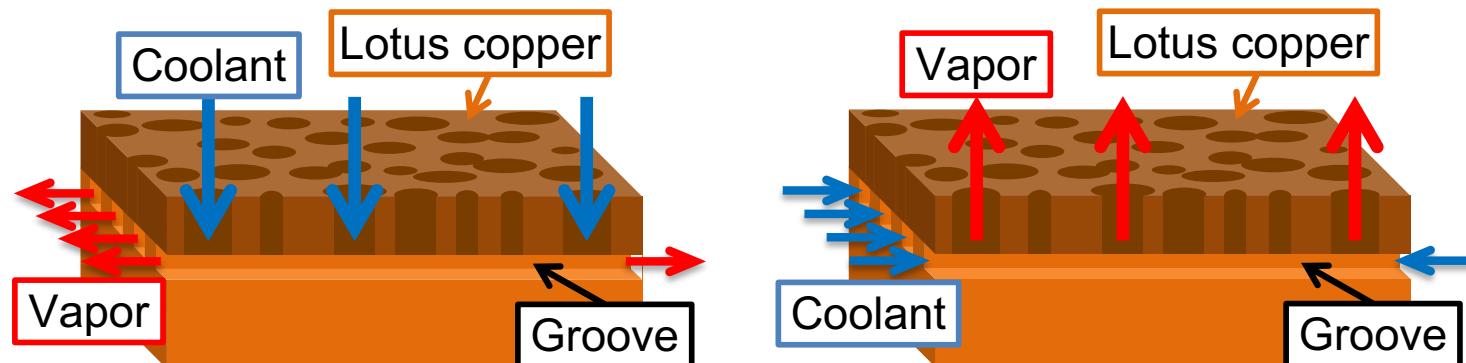


Fig. Liquid-vapor separation by lotus on grooved surface

- 水の場合：600W/cm<sup>2</sup>の冷却を実証（パワエレ等への応用）
- FC-72の場合：100W/cm<sup>2</sup>の冷却実証  
(スパコン、データセンタ等への応用)

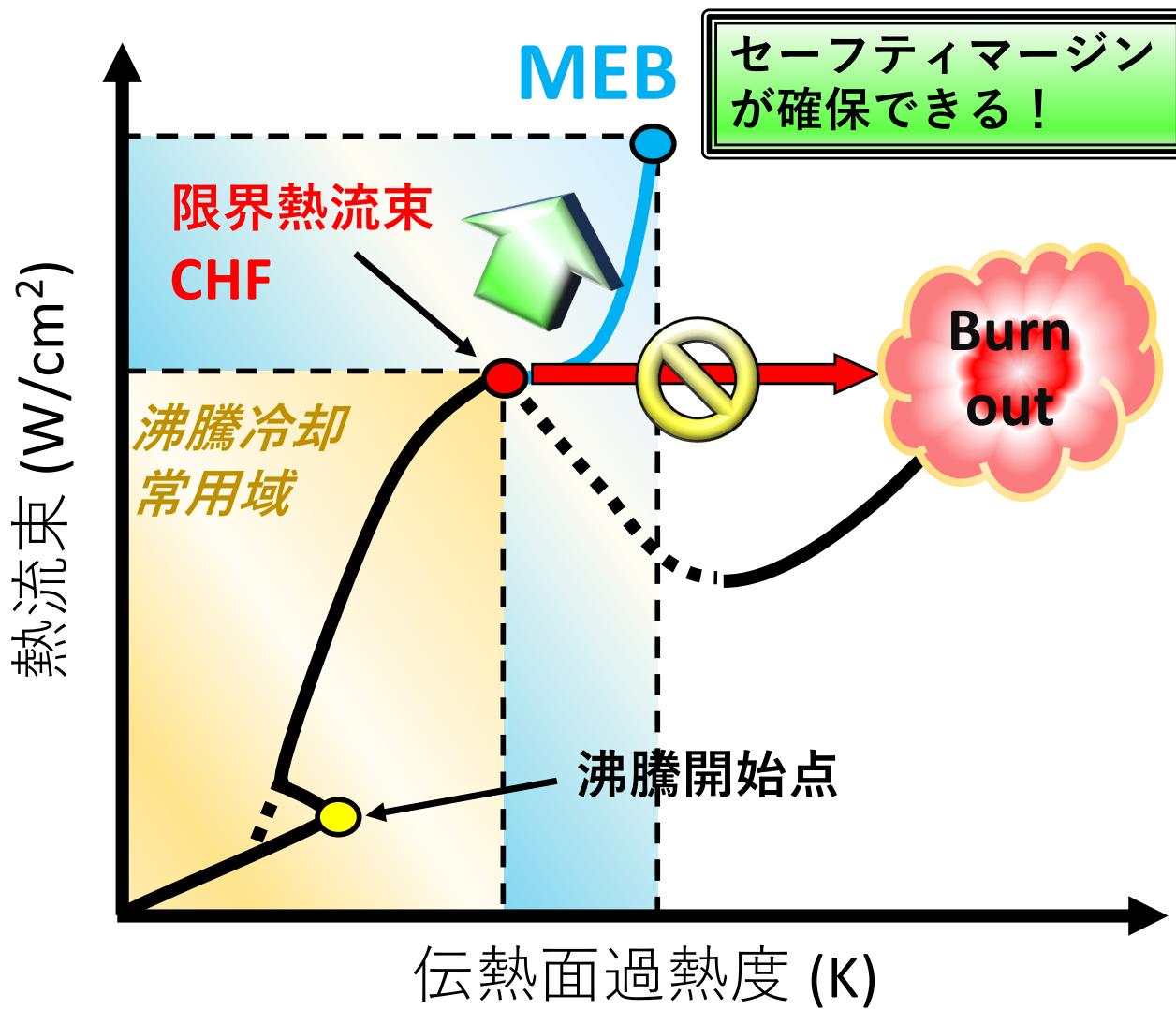
# 気泡微細化沸騰技術を使った 次世代高発熱密度電子機器の省エネ冷却

---

東京理科大学

海野 徳幸

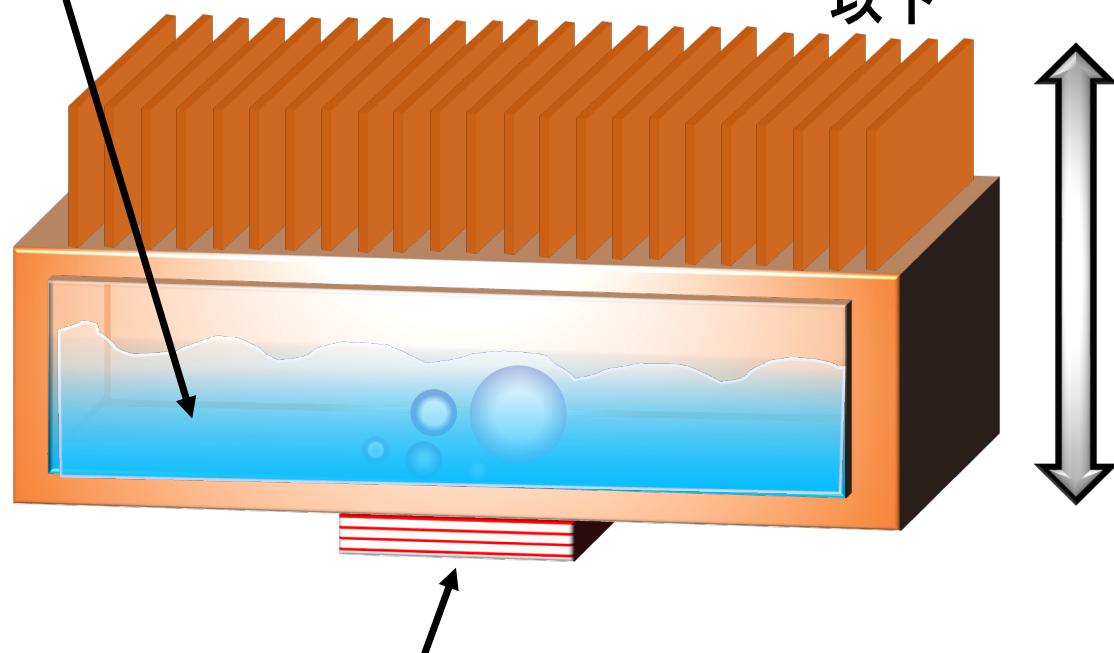
# 沸騰冷却の通常限界を超える 気泡微細化沸騰技術



- ・ 気泡微細化沸騰 (Microbubble Emission Boiling) は水温を高サブクール環境にコントロールすることで発現
- ・ ポンプ動力を大幅に低減できるプール沸騰時に 1000 W/cm<sup>2</sup> 超の冷却が可能

# コンパクト沸騰冷却デバイス ～リキッドチャンバー～

容積 100 mL  
以下



次世代超高集積3次元積層チップ  
ターゲット熱流束～数百W/cm<sup>2</sup>超

目標高さ 1U  
(= 約 44 mm)  
以下

- ・ベイパーチャンバーよりも液封入量が多く、  
ウイック不要  
(毛細管限界に律速されない)
- ・液体と電子機器が直  
接触れないで絶縁性  
フッ素系冷媒を使わな  
くても良い
- ・純水使用時、減圧下  
**MEB**により **300 W/cm<sup>2</sup>**超  
の冷却が可能

# 沸騰熱伝達制御のための要素技術

---

沸騰冷却の実用可能範囲の拡大に向けて

- 沸騰伝熱面の新規加工手法
- 狹隘空間、圧力や水位、溶存ガスの影響
- ぬれ性などの表面性状が沸騰伝熱に与える影響
- 様々な表面におけるライデンフロスト現象

に関する研究を行っています。