中性子ラジオグラフィーによる積層型ベーパーチャンバー内冷媒分布の測定

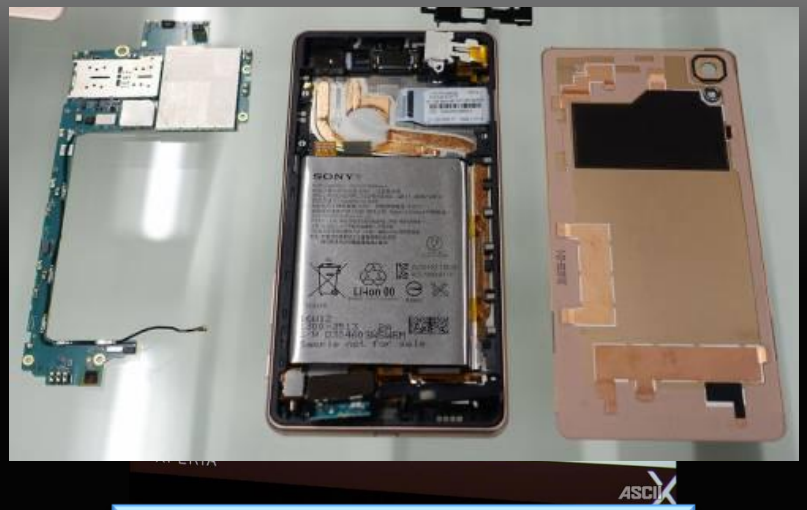
国立大学法人　鹿児島大学工学部
先進工学科化学工学プログラム
水田　敬

電子機器において
ますます深刻化する発熱問題

高性能タブレット

Surface Pro 4の熱設計に関する分析
(iFixitホームページより)

高性能スマートフォン



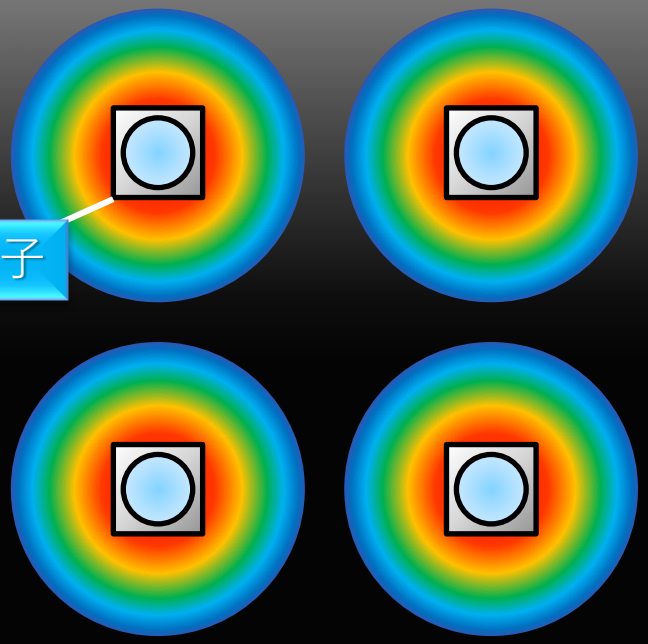
Xperia X performanceの
熱設計に関する分析
(ASCiiホームページより)

機器温度上昇により、
動作不安定化、効率低下、
短寿命化を引き起こす

小型・高性能化により
発熱密度が上昇し、
放熱がより困難に

光のクオリティー向上と受熱抵抗低減が不可分であるLED光源

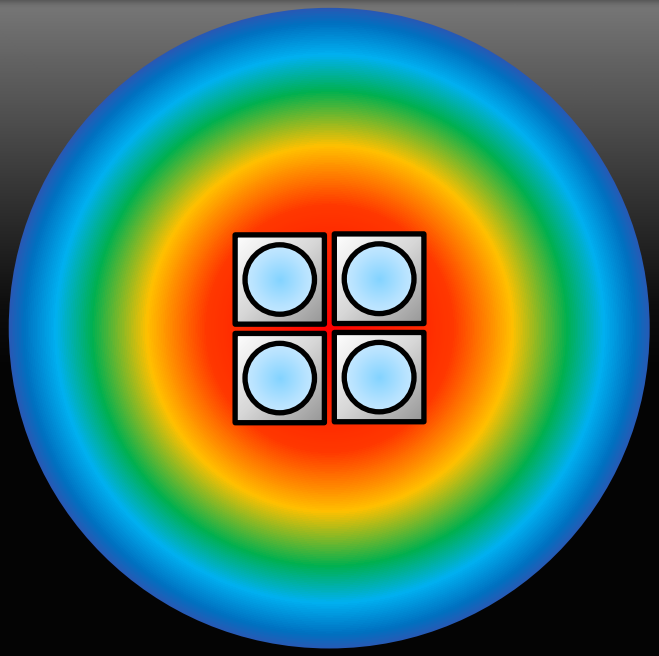
光源の間隔が広い場合



熱密度：低い(放熱しやすい)

放射発散度：低い(暗い)

光源の間隔が狭い場合



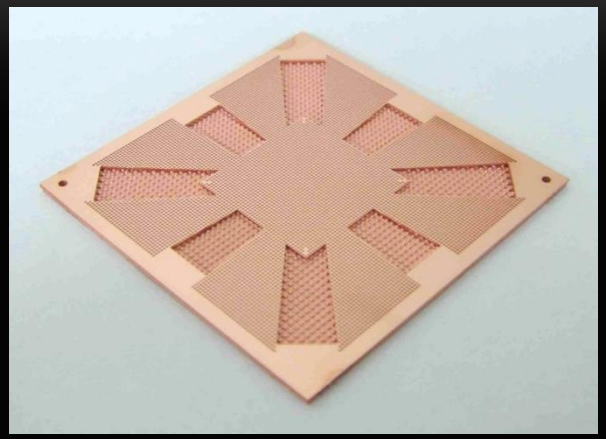
熱密度：高い(放熱しにくい)

放射発散度：高い(明るい)

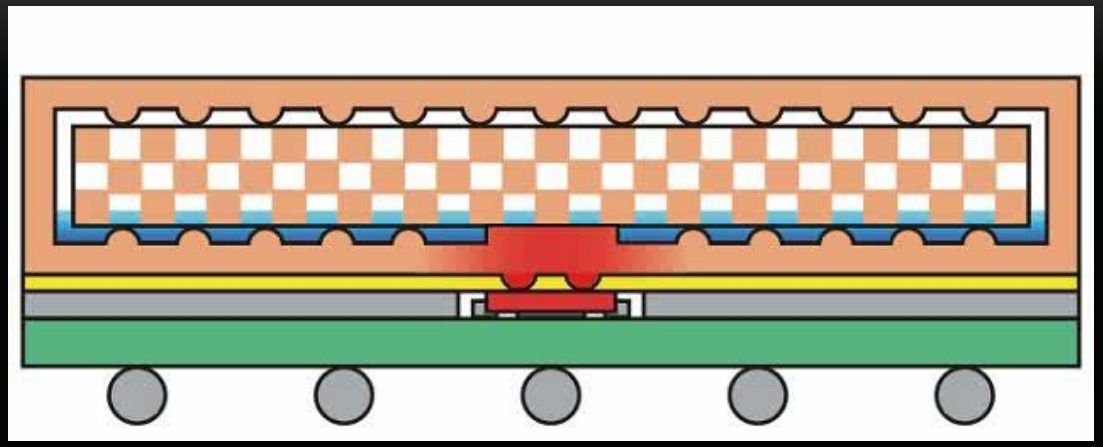
明るい(放射発散度が高い)照明を実現するためには、受熱抵抗の低減が必須

高い熱密度に対応するために開発された積層型ベーパーチャンバーFGHP(Fine Grid Heat Pipe)について

- 内部にマイクロヒートパイプ構造を有する積層型ベーパーチャンバー
- 微細エッチング加工技術により、ウィックを形成するため、精密な構造制御が可能（＝従来技術に対するアドバンテージ）



(i) Inner structure



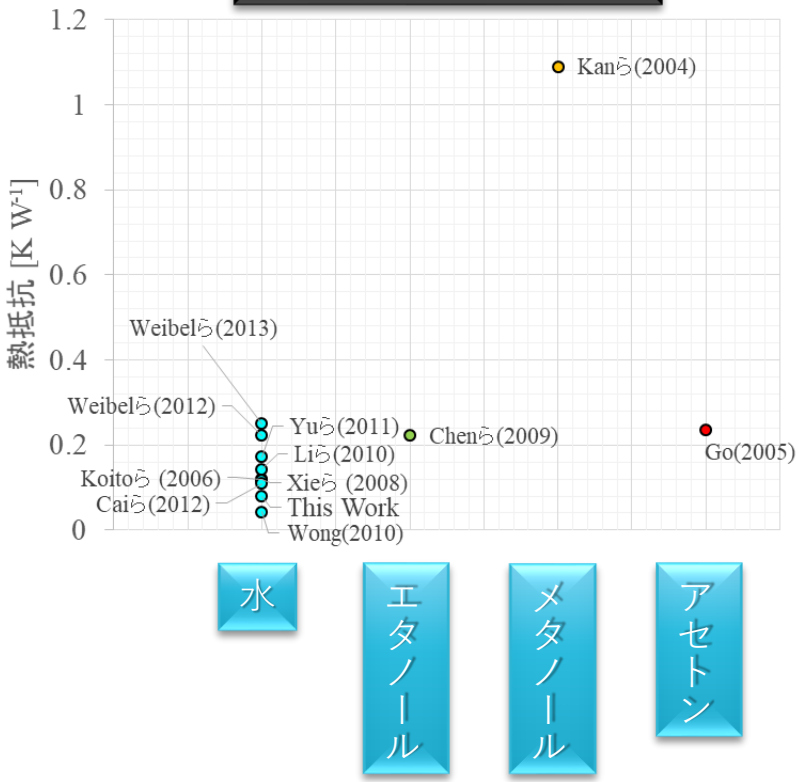
(ii) Coolant circulation

Fig. FGHP(Fine Grid Heat Pipe) heat pipe heat spreader.

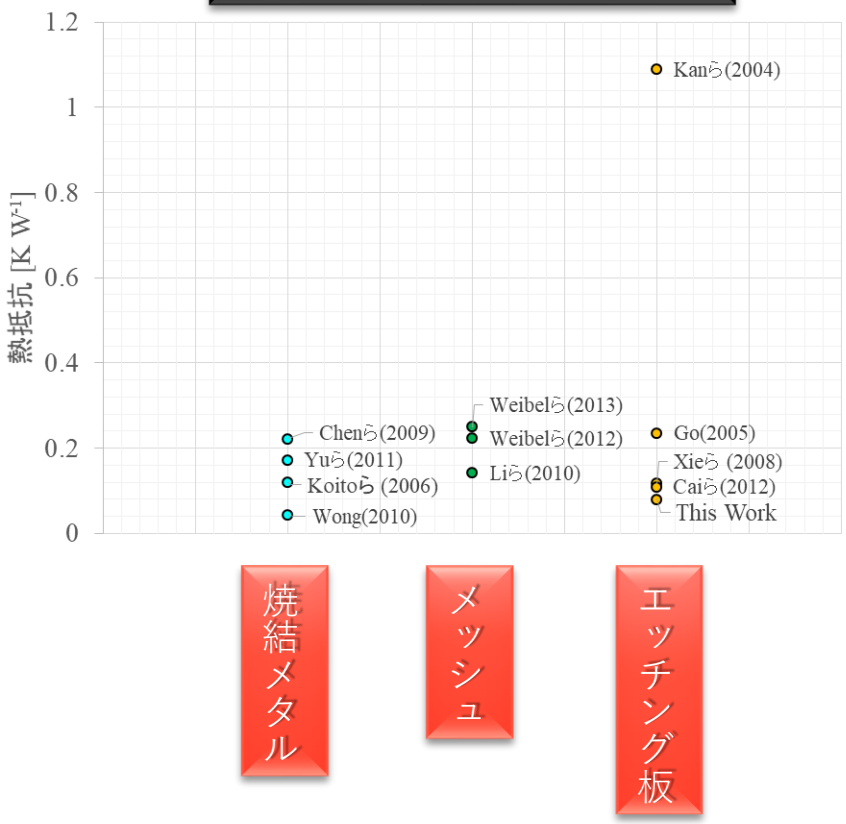
内部構造を最適化することによって
高い熱拡散性能を実現

同一基準での評価が困難な ベーパーチャンバーの伝熱特性

冷媒の種類の影響



ウィックの種類の影響



ベーパーチャンバー同士の適正な比較や
ベーパーチャンバーを用いたシステムの最適設計は困難

冷媒循環に与える設置姿勢の影響

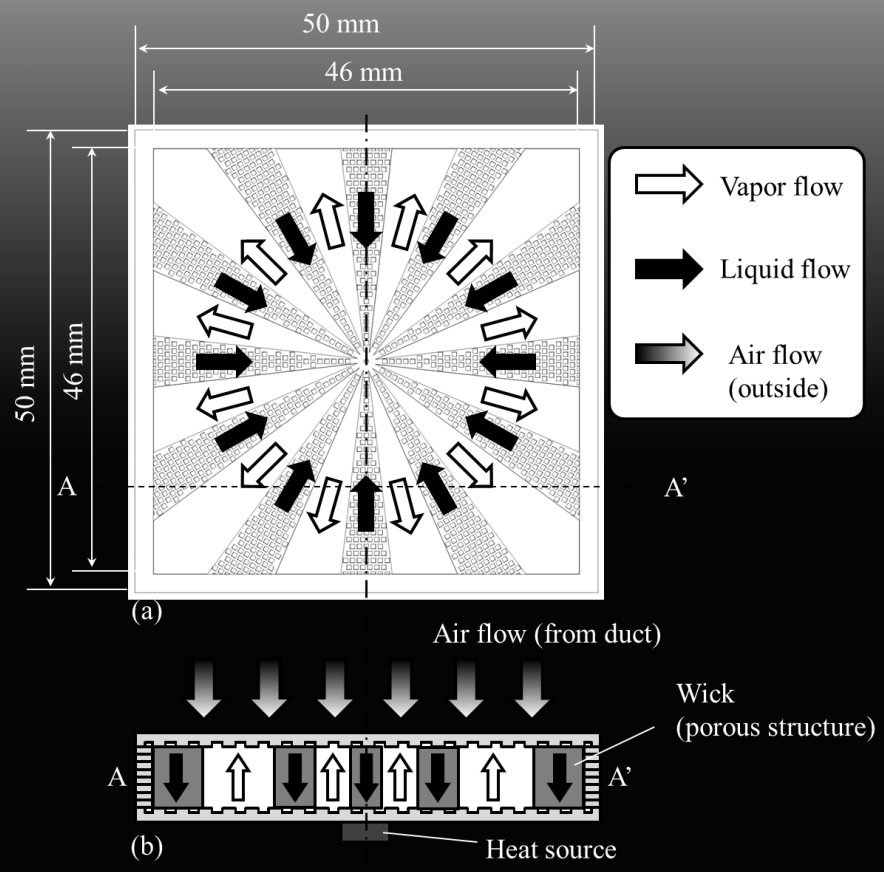
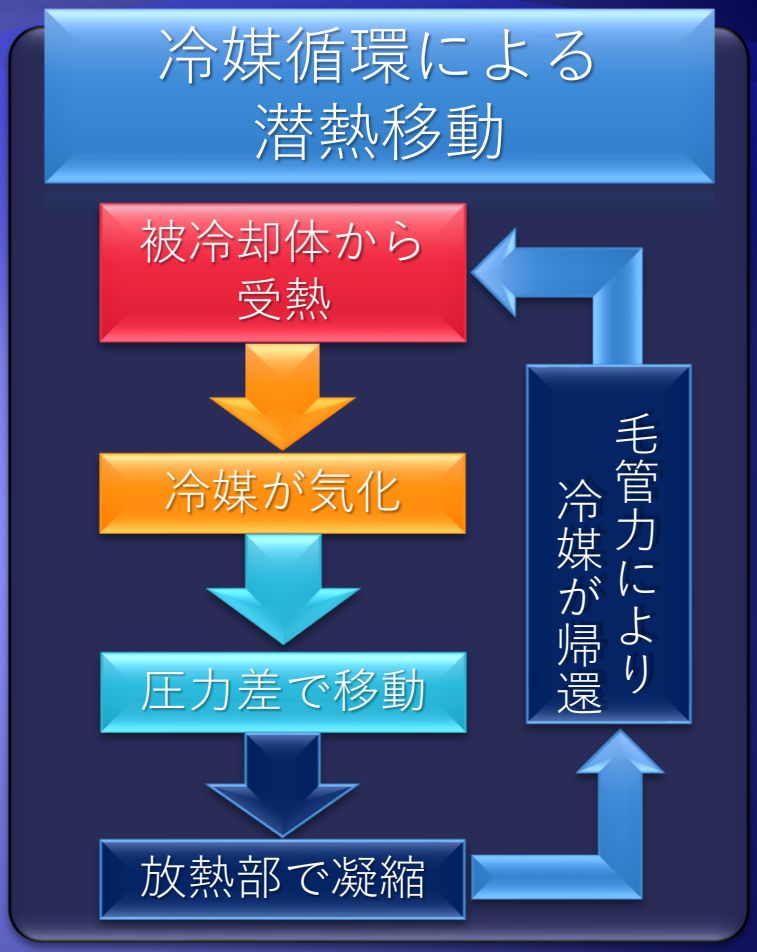


Fig. FGHP内における冷媒循環
(a) 中板の上面図
(b) 図(a)におけるA-A'断面図



冷媒循環は設置姿勢によっては重力に影響される可能性があり、それによる熱的性能の変化が生じ得る[1)2)3)]

1) L. Chen et al., *Applied Thermal Engineering*, **166** (2020) 114686, 2) W. Liu et al., *Applied Thermal Engineering*, **140** (2018) 131-138,
3) F Yao et al., *Applied Thermal Engineering*, **141** (2018) 1000-1008

本研究の目的

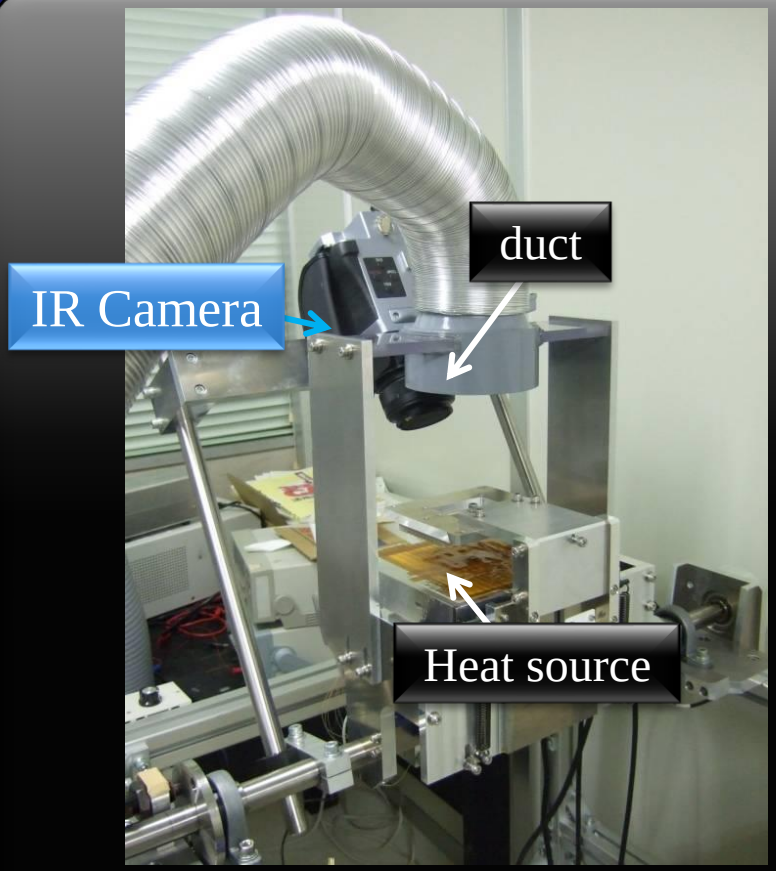
1. 積層型ベーパーチャンバーFGHPと他のベーパーチャンバーとの適正な性能比較を　実施する

2. 高い異方性熱伝導をもつ物質の熱伝導率を定量化する新たな手法を提案し、妥当性について検証する

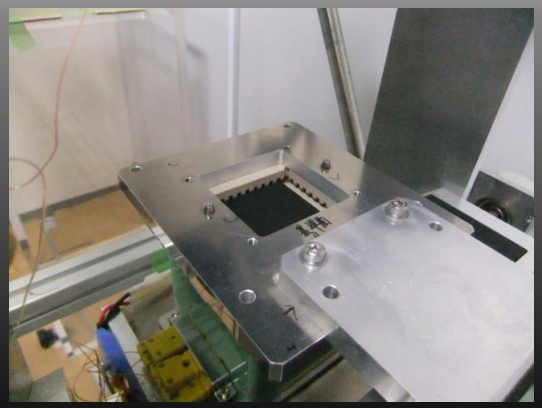
3. 実験結果をもとに熱伝導率を求め、FGHPの特性について調べる

4.最も重力影響が大きな鉛直設置姿勢において、FGHP内部の冷媒がどの様に分布するかを調べる

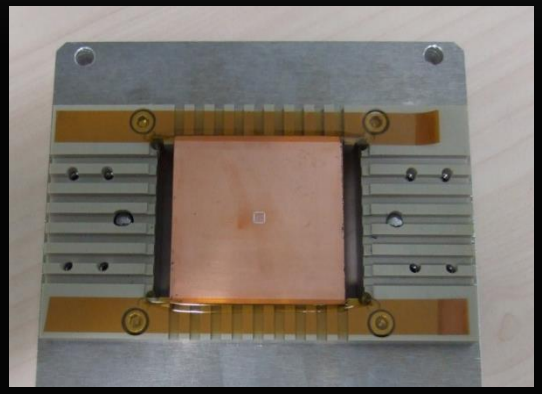
FGHPの熱的特性評価について



(a) Experimental apparatus.



(b) Test sample (top view).



(c) Test sample holder (bottom view).

Fig.熱特性評価装置の構成
(a) 実験装置全体図
(b) テストサンプル(上面)
(c) テストサンプルホルダー(下面)

熱特性評価用熱源

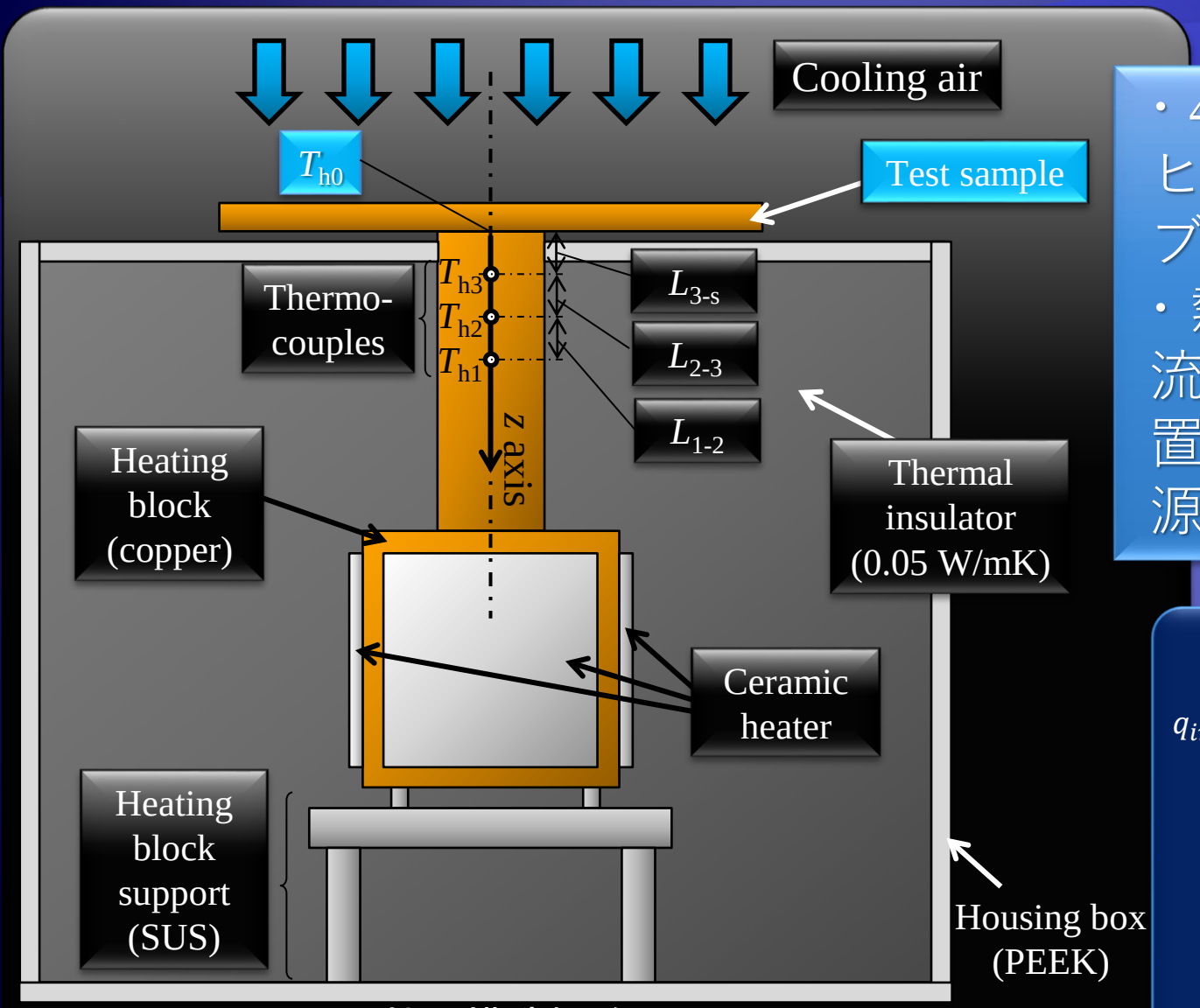


Fig. 熱源構造概略図

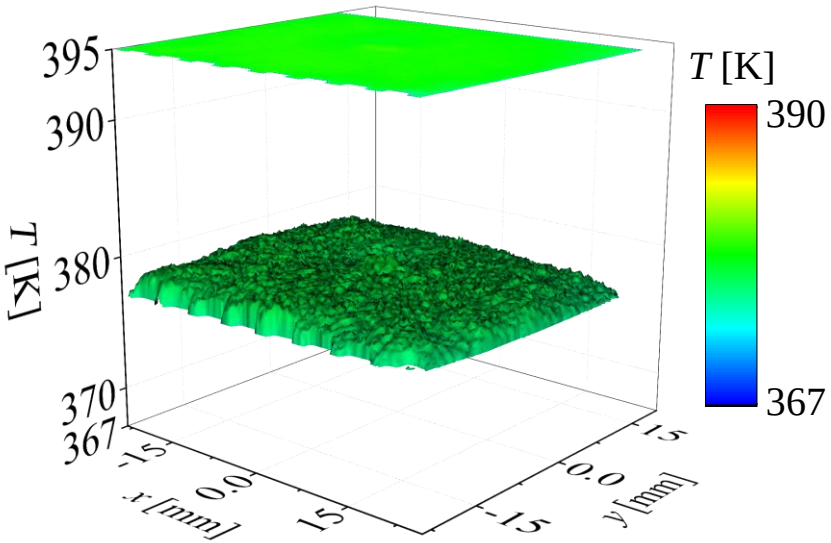
・4つのセラミックヒーターにより熱源ブロックを加熱
・熱源ブロックの熱流入部に熱電対を設置し、流入熱量・熱源表面温度を推定

$$q_{in} = k_{Cu}\left(\frac{\frac{T_{h1}-T_{h2}}{L_{1-2}}+\frac{T_{h2}-T_{h3}}{L_{2-3}}}{2}\right)$$

$$R_{smpl} = \frac{(T_{btm} - \langle T_{top}\rangle)}{Q_{in}}$$

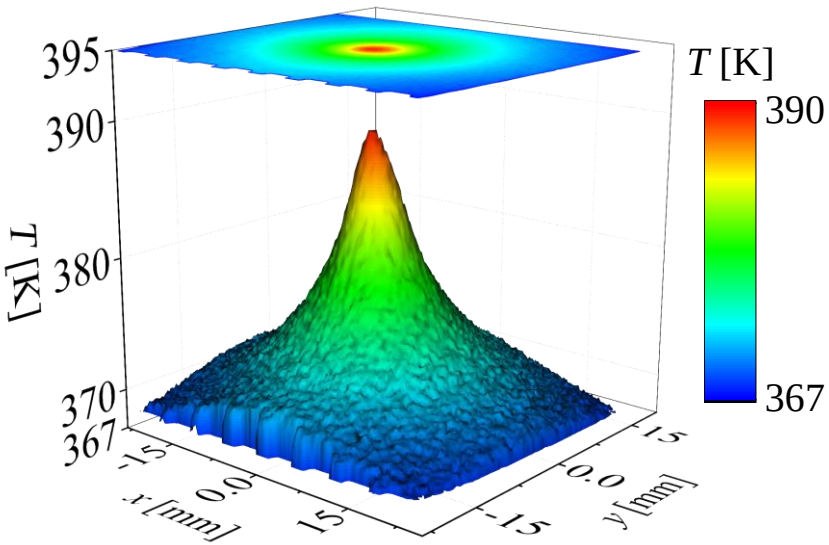
$$R_{total} = \frac{(T_{btm} - T_{air})}{Q_{in}}$$

FGHPと銅板との温度平滑化効果の比較
～サーモグラフィによる上面温度測定結果～



49.7 W

FGHP



43.6 W

CuHS

熱源温度による熱抵抗の変化
~サンプル熱抵抗~

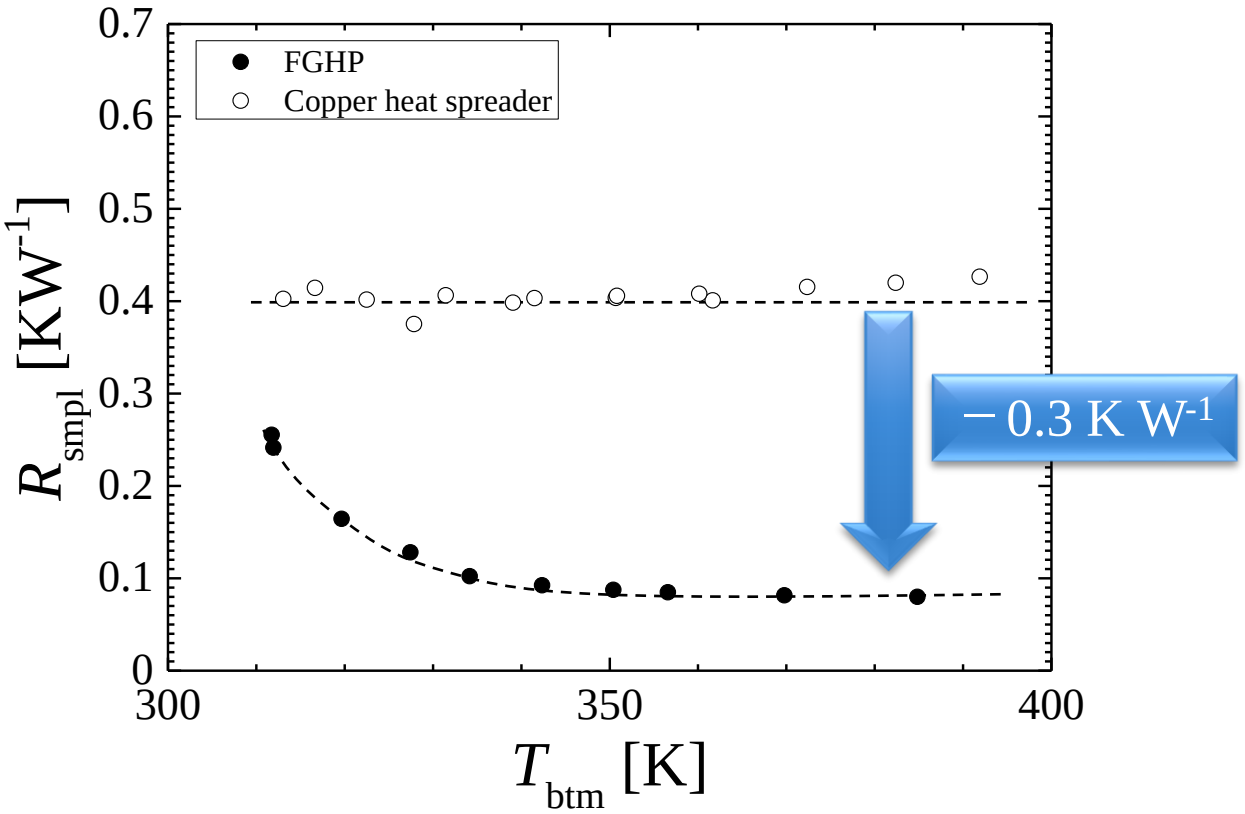
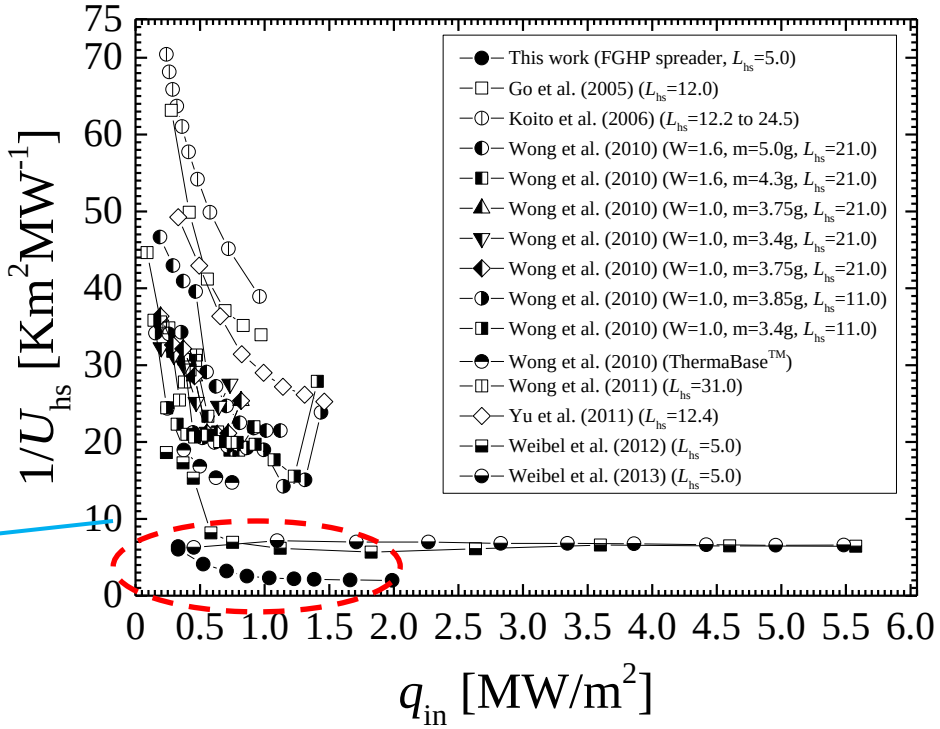


Fig. サンプル熱抵抗の下面温度に対する変化

さまざまな構成のベーパーチャンバー

Author	Vapor chamber type			Dimension					Heat input [W]	Thermal characteristics (Thermal resistance or effective thermal conductivity. The best case in the respective research.)
				Spreader		Heat source				
	Casing material	Working fluid	Wick material	Size	Area [mm^2]	Size	Area [mm^2]	Ratio		
This work	Copper	Water	Copper plates manufactured by etching technique	50x50x2.0	2500	5x5	25	0.01	49.7	0.080 KW^{-1}
S. W. Kang et al.(2004)	Copper	Methanol	Copper plate manufactured by etching technique	31x31x2.7	961	13.97x13.97	195	0.20	45	1.09 KW^{-1}, Fig. 8, groove 82 %
Jeun San Go (2005)	Aluminum	Acetone	Stainless steel manufactured by etching technique	83.1x69.1x3.5	5742	12x12	600	0.10	140	0.236 KW^{-1} (evaporator), Fig. 6(b)
Yasushi Koito et al. (2006)	Copper	Water	Sintered copper powder (porosity: 40%)	76.2x88.9	6774	24.5x24.5	600	0.089	144	The effective thermal conductivity in the liquid-wick region, k_{eff}, is 8.32 $Wm^{-1}K^{-1}$.
Yasushi Koito et al. (2006)	Copper	Water	Sinter made of copper powders (porosity: 40 %)	76.2x88.9x4.6	6774	12.2x12.2 17.3x17.3 24.5x24.5	149 299 600	0.022 0.044 0.089	24 - 220	0.12 KW^{-1}, Fig. 10
X.L. Xie (2008)	Copper	Water	Parallel plate	42x35	1470	-	-	-	50 - 420	0.118 KW^{-1} (heat sink total), Fig. 7
Yen-Shu Chen et al. (2009)	Copper	Ethanol	Sintered copper powders has a thickness of 0.5 mm and a porosity of 0.36	86x71x5	6106	10x10 20x20 40x40	100 400 1600	0.016 0.066 0.26	30 - 60	R_{vc} [KW^{-1}] 0.0357 (aspect ratio 0.512) Orthotropic approach k_s [$Wm^{-1}K^{-1}$] 48.74 k_l [$Wm^{-1}K^{-1}$] 2316.1, Table 1
Hung-Yi Li et al. (2010)	Copper	Water	Mesh	87.6x92x4	8059	-	-	-	30	0.143 KW^{-1}, Fig. 6
Jung-Chang Wang et al. (2010)	Copper	Water	Porosity of the capillary structure in the interior of cavity is under 0.5	90x90x3	8100	90x71	6390	0.79	60 - 180	965 $Wm^{-1}K^{-1}$, at 55 CFM, Conclusion
Shwin-Chung Wong (2010)	Copper	Water	200 mesh x 1 or 2 with 100 mesh with parallel channel of 1.0 mm (W1.0), 1.6 mm (W1.6), 2.0 mm (W2.0) width, triangle cross section	100x80x1.0-1.5	8000	11x11 21x21	121 441	0.015 0.055	17 -365	0.0429 KW^{-1}, Fig. 8
Shwin-Chung Wong (2011)	Copper	Water, methanol, acetone	Bottom: 200 mesh, top: 100 mesh with parallel channel of 1.0 mm width, triangle cross section	100x80x1.0-1.5	8000	11x11 21x21 31x31	121 441 961	0.015 0.055 0.12	17 -365	0.027 KW^{-1} (Water, 9.61 cm^3), Fig. 8a
Xiaoling Yu et al. (2011)	Copper	Water	Sintered copper powder	Φ50	1963	12.4x12.4	154	0.078	200	0.173 KW^{-1}, Table 2
Qingjun Cai et al. (2012)	Silicon	Water, ethanol	Silicon	38x38x3	1444	30x4	120	0.08	4.5-10	0.110 K/W, Table 2, Sample D (Obtained from 1D heat transfer experiment)
Justin A. Weibel et al. (2012)	Copper	Water	CNT, partially opened plate	25.4x25.4	645	5x5	25	0.039	6 - 140	0.223 KW^{-1}, G:0 (Grid pattern), Fig. 5a
Justin A. Weibel et al. (2013)	Copper	Water	Integrates conventional copper screen mesh and carbon nanotubes	25.4x25.4x1, substrate	645	5x5	25	0.039	5 - 138	0.25 KW^{-1}, Fig 7

他のベーパーチャンバーとFGHPとの比較
～熱源面積基準の総括伝熱係数～



FGHPの結果

U_{hs}が最大

Fig. 種々のベーパーチャンバーに関する修正熱抵抗の入熱量による変化

種々のベーパーチャンバーの中で
FGHPは最大の伝熱性能を有する[4)]

4) K. Mizuta et al., *Applied Thermal Engineering*, 104 (2016) 461-471

ベーパーチャンバーに適用可能な定常法を用いた異方性熱伝導率推定手法について[5)]

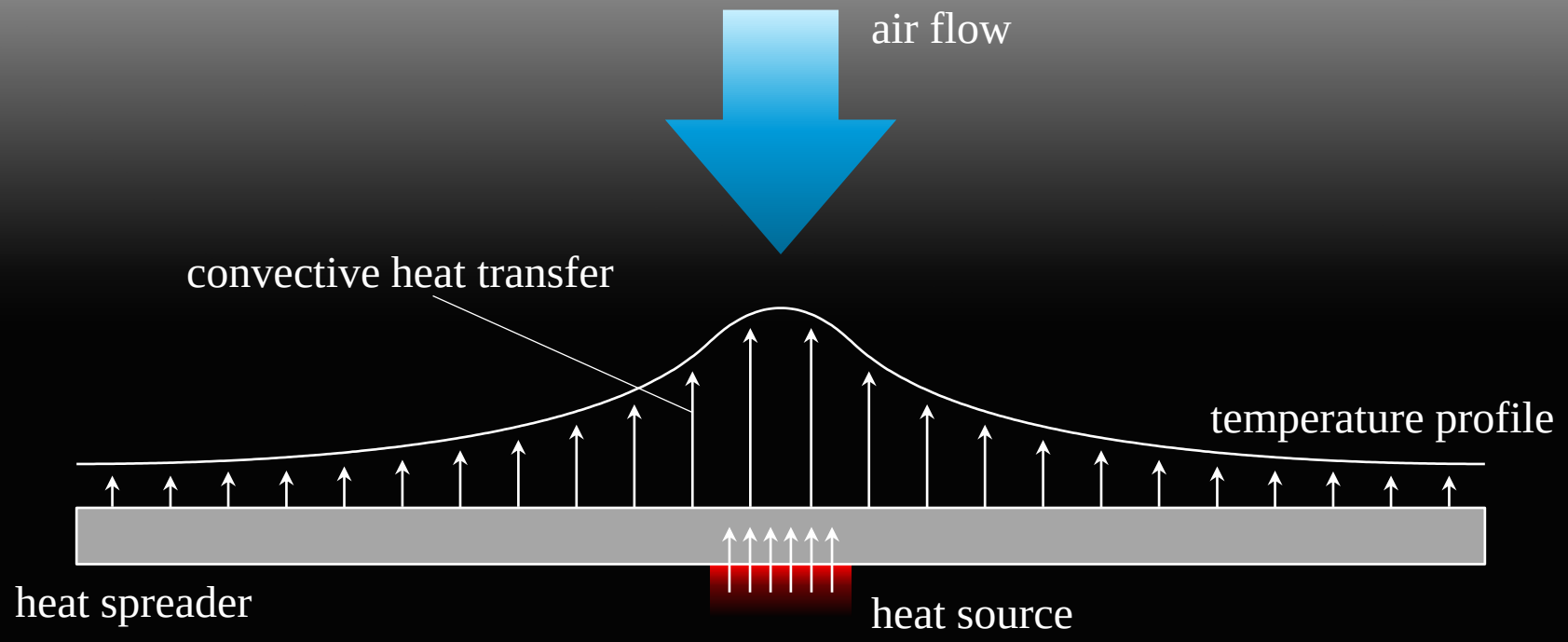
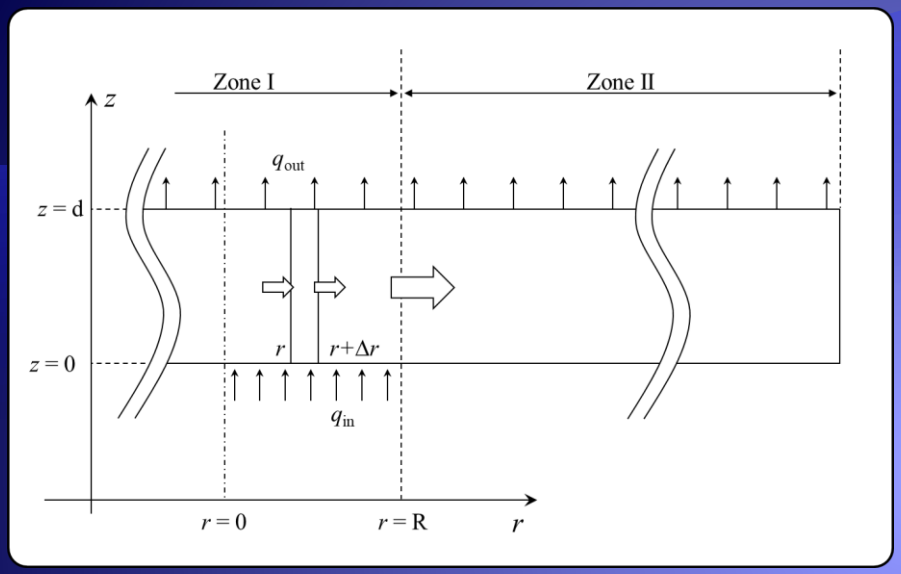


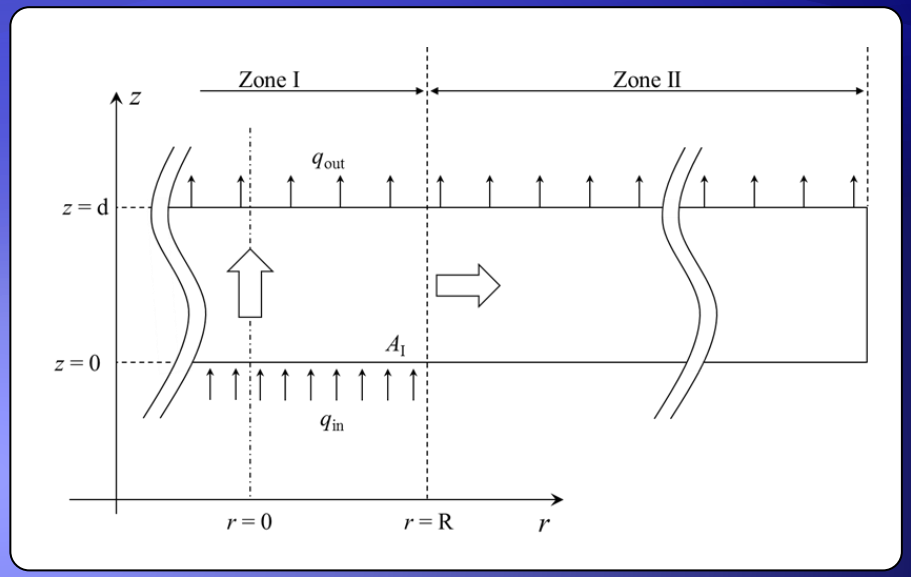
Fig.　想定している系についての概念図.

半径方向・厚さ方向のそれぞれについて擬一次元的な伝熱モデルを仮定し、実験値より異方性熱伝導率を推定する

5) K. Mizuta et al., *Applied Thermal Engineering*, 146 (2019) 843-853

各方向に関する伝熱モデルの特徴





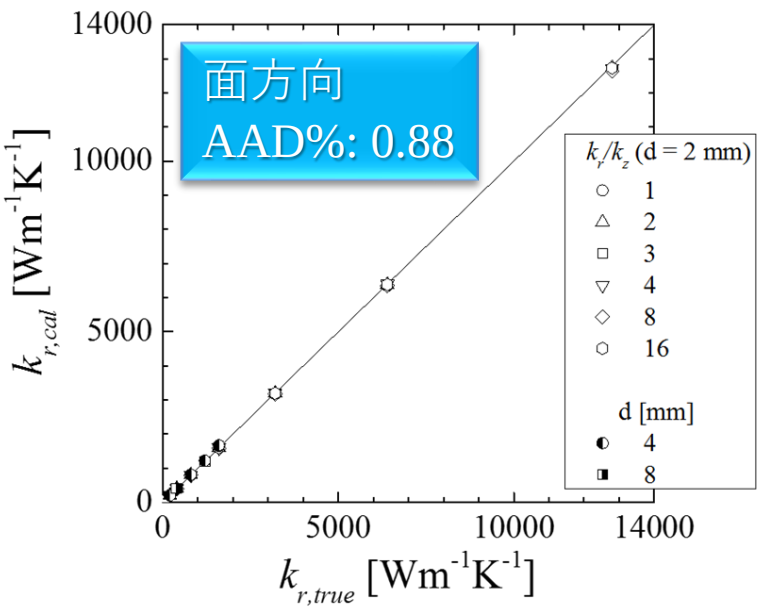
半径方向伝熱について

- ヒートスプレッダ外縁部における対流伝熱を考慮した解析解を導出
- 修正ビオ数によって厚み方向熱移動の影響を考慮

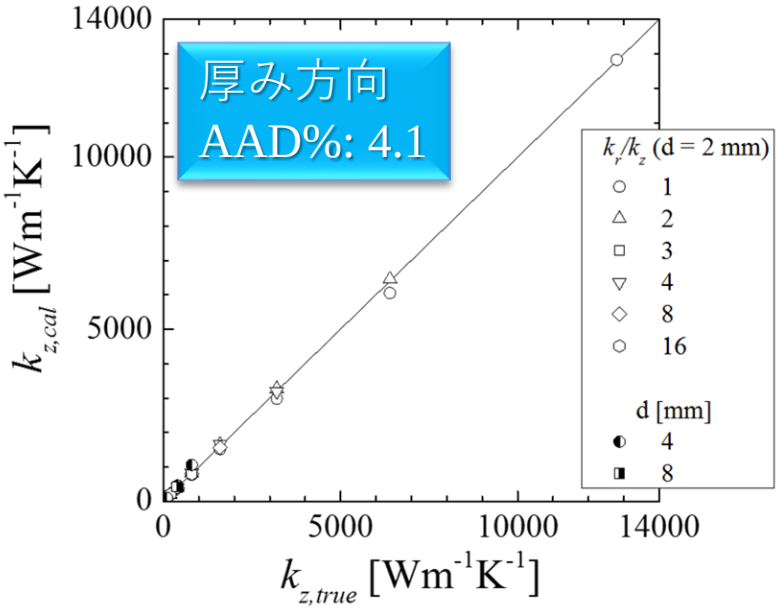
厚み方向伝熱について

- 形状係数によって半径方向の熱移動の影響を考慮
- 有限サイズのスプレッダに対する形状係数を定義

本モデルによる高精度な熱伝導率の推定



(a) k_rについて



(b) k_zについて

Fig. 熱伝導率の真値と推定値との比較

新たに提案したモデルによって異方性を持つ物質の熱伝導率を高精度に推定可能[2)]

5) K. Mizuta et al., *Applied Thermal Engineering*, 146 (2019) 843-853

半径方向温度分布推定値と実測値との比較

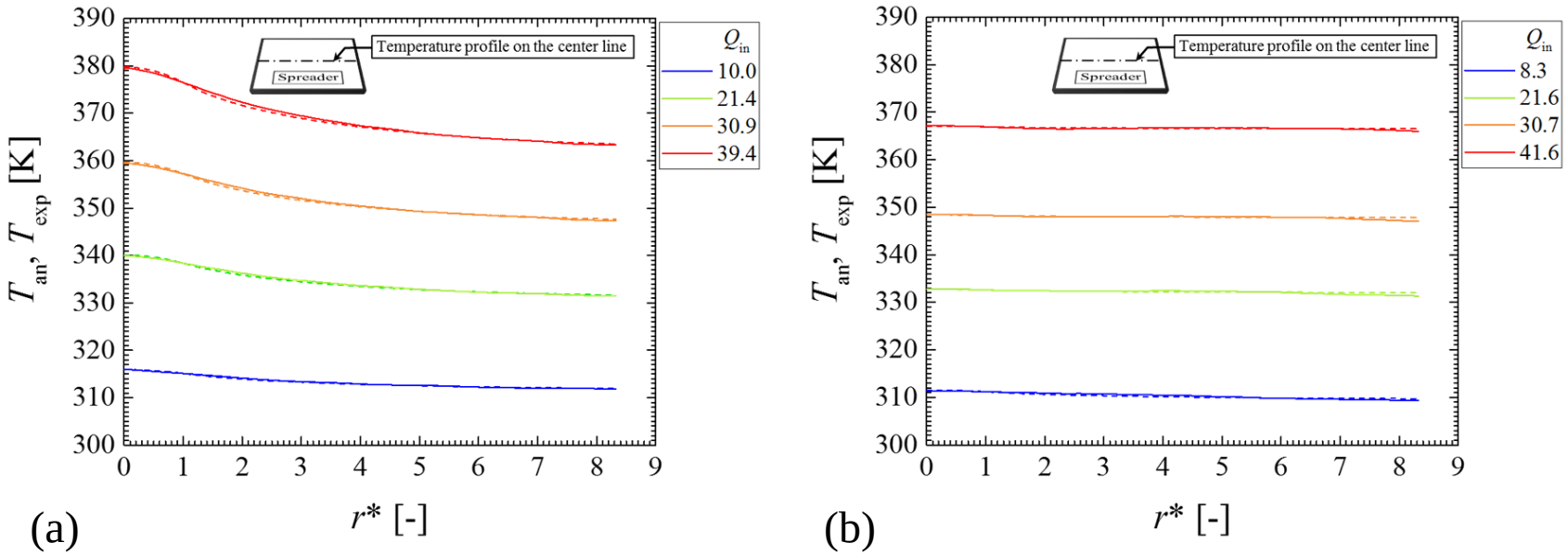


Fig. 表面温度分布の実測値と推算値との比較
(実線: 実測値, 破線: 式(3.20), (3.27), (3.28)による計算値)
(a) 銅製ヒートスプレッダ (b) FGHP

銅製ヒートスプレッダ・FGHPとも、
実測された温度プロファイルを高精度に推定[2)]

5) K. Mizuta et al., *Applied Thermal Engineering*, 146 (2019) 843-853

FGHP熱伝導率の異方性と温度による変化

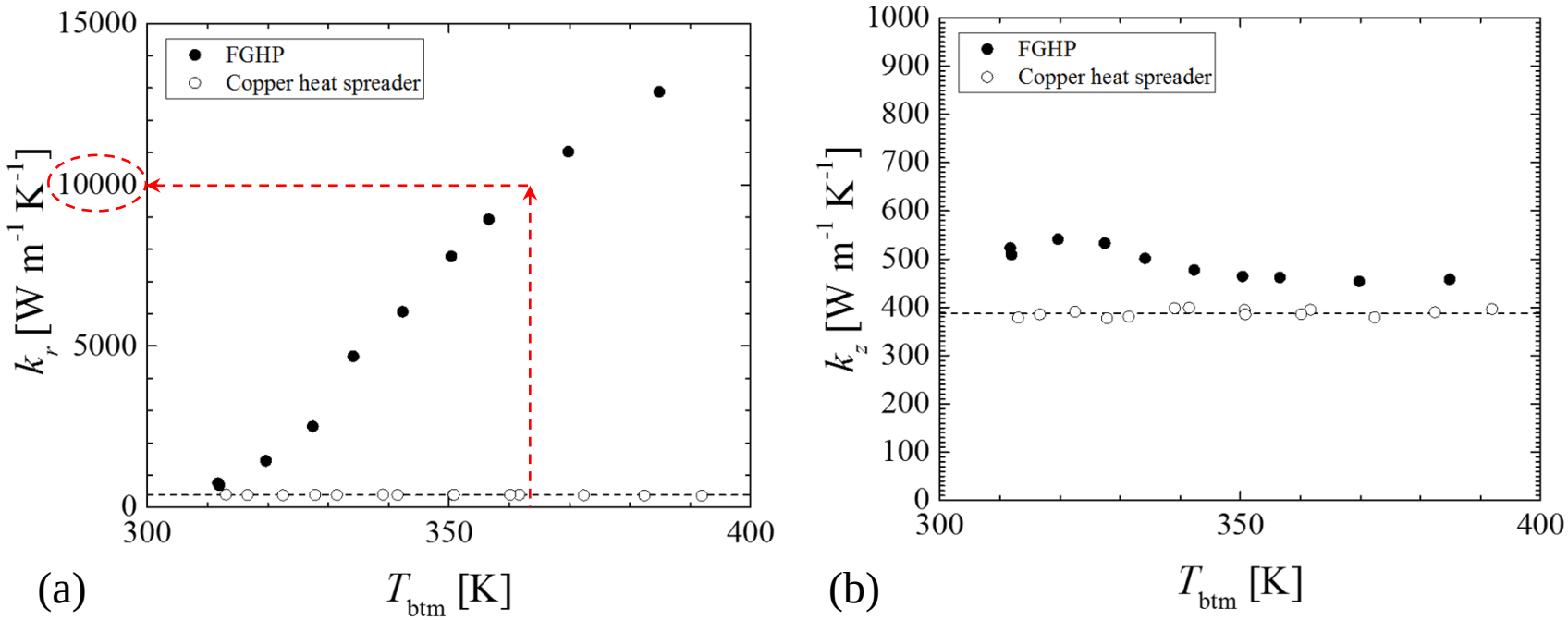


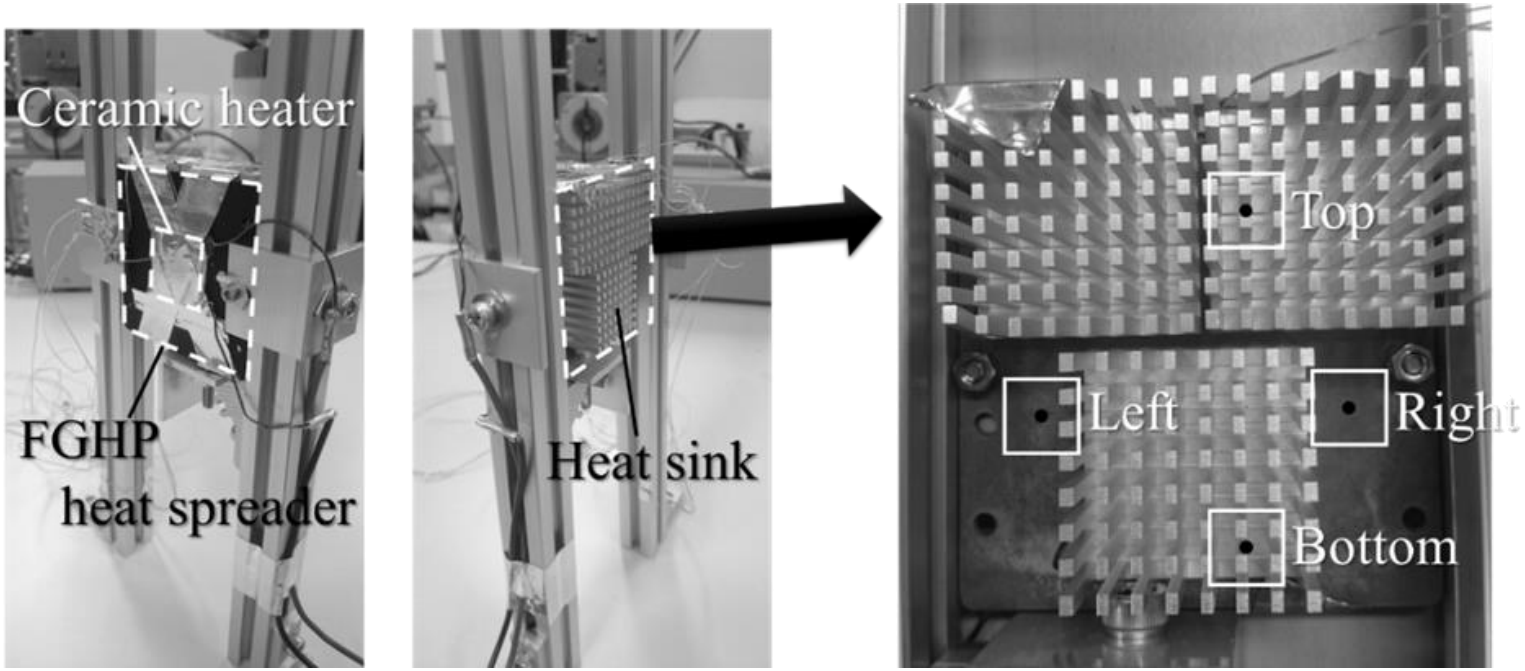
Fig. サンプル下面温度に対する熱伝導率の変化
(a) k_r (b) k_z

電子デバイスが実際に使用される温度領域において、
面方向熱伝導率は銅の25倍に達する[2)]

5) K. Mizuta et al., *Applied Thermal Engineering*, 146 (2019) 843-853

中性子ラジオグラフィーによる冷媒分布測定1
可視化サンプルの構成

・京都大学複合原子力科学研究所：E-2ポート
・露光時間：300 s (1 MW)



(a) Front side (b) Rear side (c) Measurement points

Fig. 中性子ラジオグラフィーによる可視化サンプル

$$R_{th} = \frac{T_{sp} - T_a}{Q_{in}}. \tag{5.1}$$

中性子ラジオグラフィーによる冷媒分布測定2
可視化構成概略図

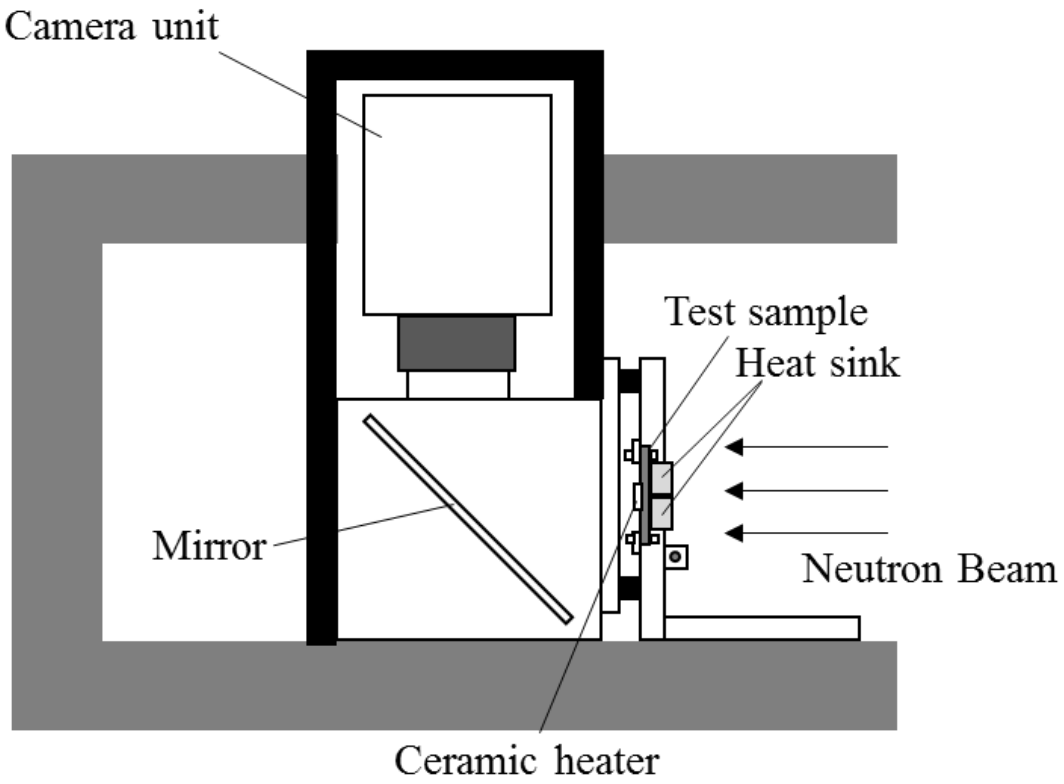
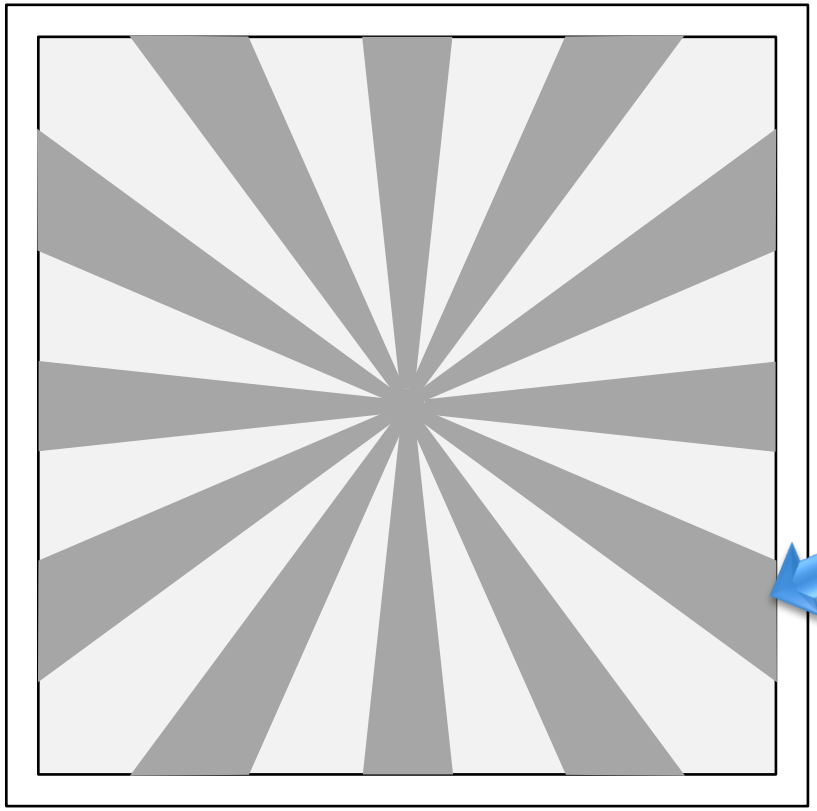


Fig. 中性子ラジオグラフィーによる可視化構成概略図

中性子ラジオグラフィーによる冷媒分布測定3
冷媒分布可視化イメージ



可視化結果より、ウィック部に存在する冷媒層の厚みを定量化する

冷媒が分布しているところはよりグレーになる

Fig. 中性子ラジオグラフィーによる可視化結果概念図

中性子ラジオグラフィーによる冷媒分布測定4
液層厚みの定量化

$$G_{VP}(x,y) = c\phi_{th}(x,y)exp(-\Sigma_{Cu}\delta_{VP}) + G_d(x,y). \tag{5.2}$$

$$G_{WK}(x,y) = c\phi_{th}(x,y)exp\big(-\Sigma_{Cu}\delta_{WK} - \Sigma_W\delta_W(x,y)\big) + G_d(x,y). \tag{5.3}$$

$$\frac{G_{WK}(x,y) - G_d(x,y)}{G_{VP}(x,y) - G_d(x,y)} = exp\big(-\Sigma_{Cu}(\delta_{WK} - \delta_{VP}) - \Sigma_W\delta_W(x,y)\big) \tag{5.4}$$

$$\delta_W(x,y) = -\,ln\left(\frac{G_{WK}(x,y) - G_d(x,y)}{G_{VP}(x,y) - G_d(x,y)}\right)\Big/\Sigma_W - \frac{\Sigma_{Cu}}{\Sigma_W}(\delta_{WK} - \delta_{VP}) \tag{5.5}$$

中性子ラジオグラフィーによる冷媒分布測定5

入熱量による熱抵抗の変化

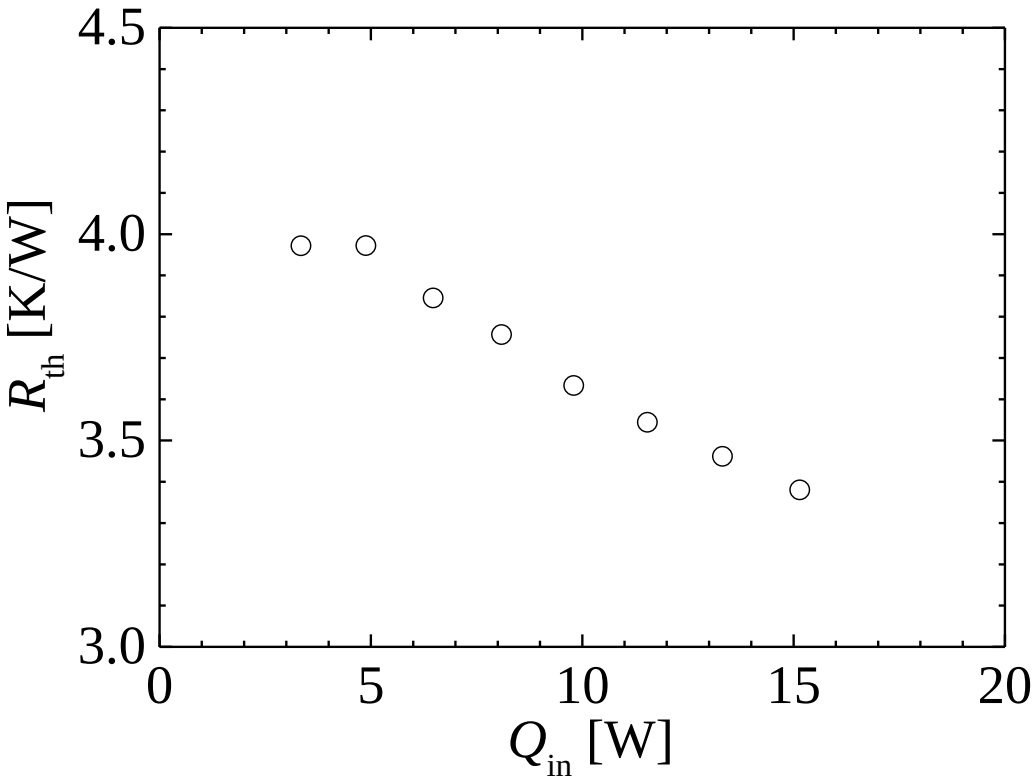
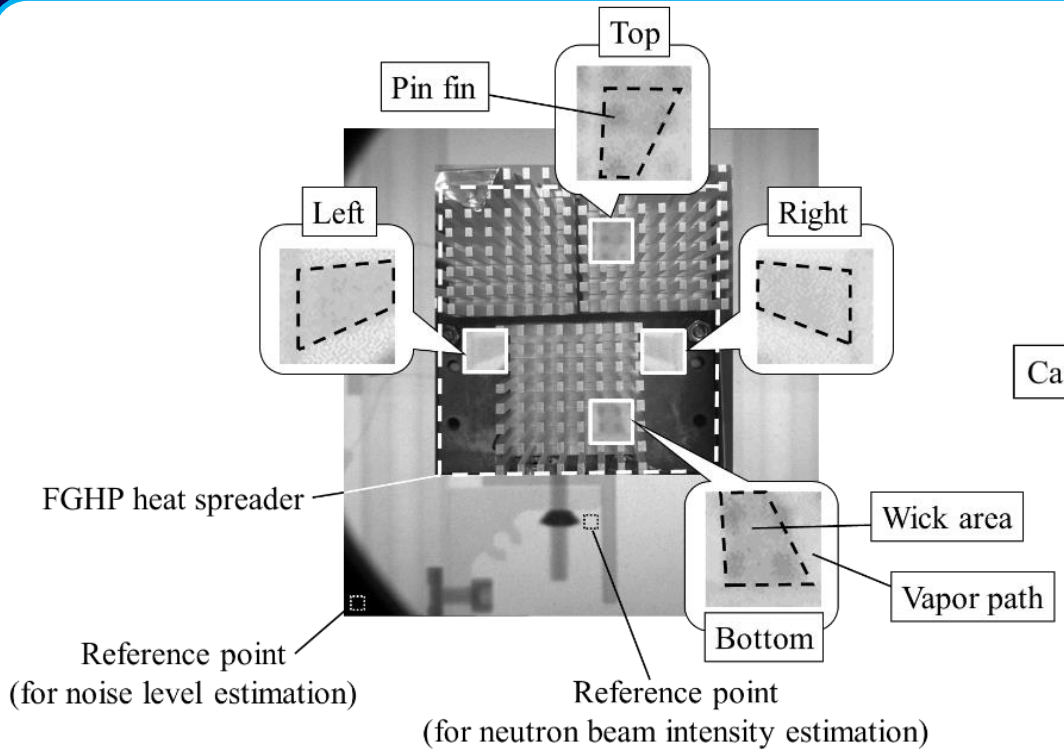
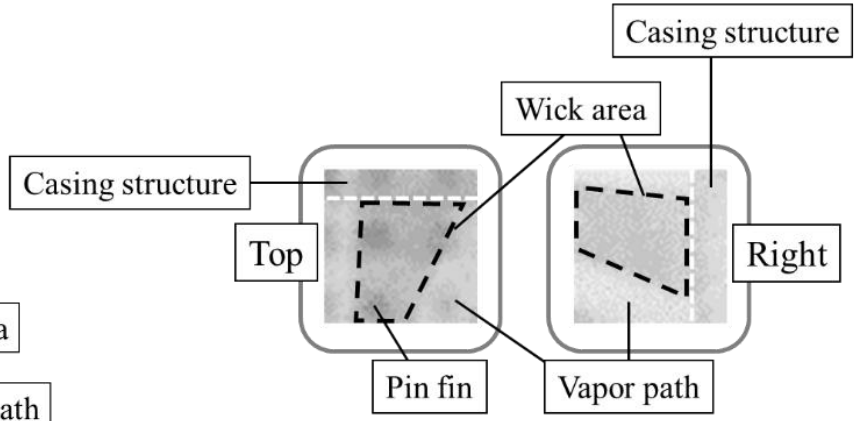


Fig.　入熱量による熱抵抗の変化

中性子ラジオグラフィーによる冷媒分布測定6
可視化画像の一例



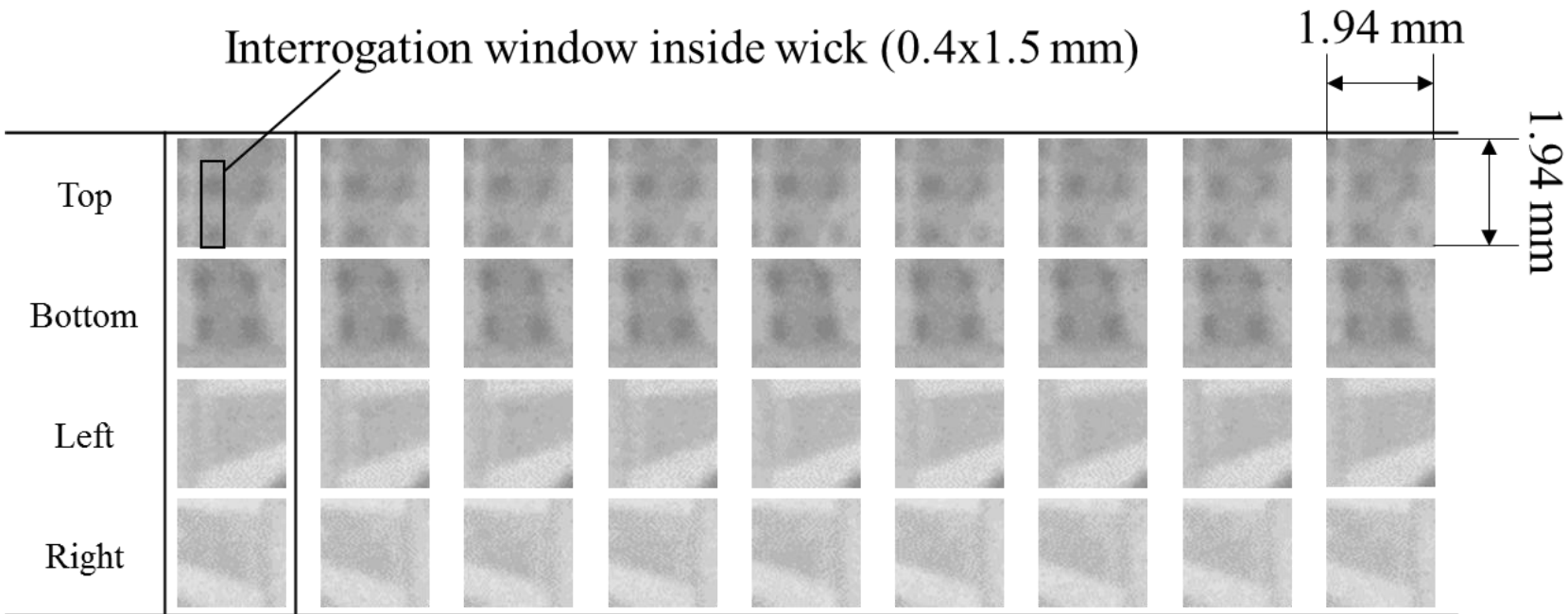
(a) 全体画像



(b) 上部及び右側の拡大画像

Fig. 代表的な中性子画像と可視光画像の合成
(各拡大画像中の黒破線内はウィック領域を示し，その外側は蒸気路を示す)

中性子ラジオグラフィーによる冷媒分布測定7
種々の加熱条件における可視化画像

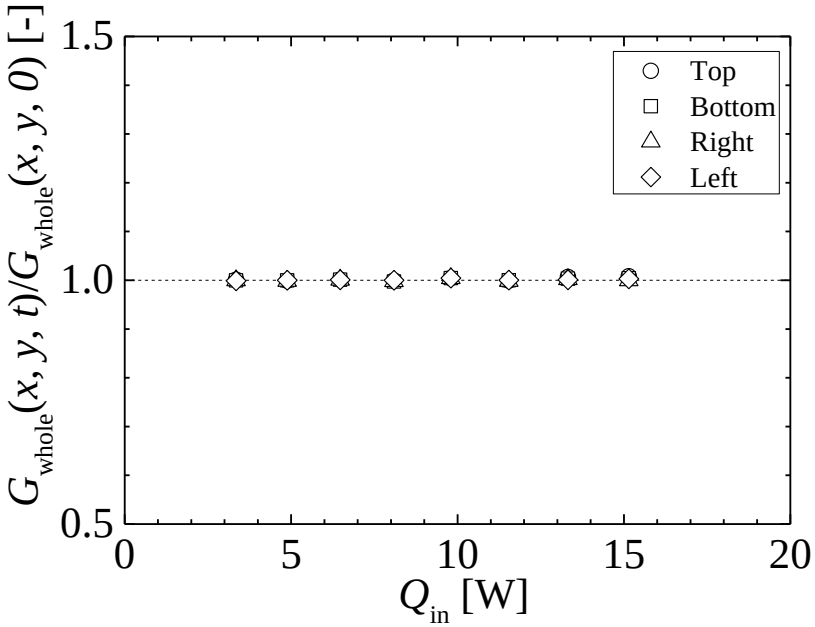


Run	0	1	2	3	4	5	6	7	8
Q_{in}	—	3.35	4.88	6.48	8.09	9.80	11.5	13.3	15.2

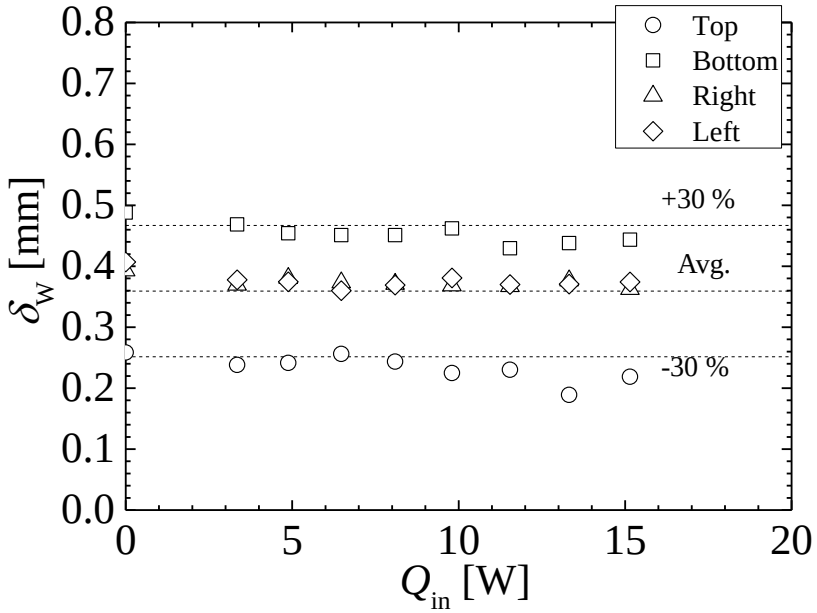
Fig. 種々の加熱条件における拡大画像

中性子ラジオグラフィーによる冷媒分布測定8

入熱量が冷媒分布に与える影響



(a) ウィック領域における規格化されたグレーレベルの空間平均値



(b) ウィック領域における液層厚み

Fig. 規格化されたグレーレベルと液層厚みの入熱量による変化

最も重力影響が大きな鉛直設置時でもウィック部は冷媒で満たされており、適正に分布している

結　言

・サンプルの総熱抵抗は、厚みの増加とともに減少することから、厚み増加に伴う経路長の増加効果に比べて、有効伝熱面積増加の効果の方が大きいことがわかった
・ 規格化した形状係数の値を用いて厚みの影響を考慮することにより、これまでよりも熱伝導率の低いサンプルについて熱伝導率を推定可能であることが示唆された
・中性子ラジオグラフィーにより、鉛直設置姿勢においても、ウィック部に冷媒が適切に存在することが確認された