

H24中性子イメージング専門研究会

フラットヒートパイプ型ヒートスプレッダ内部 における冷媒分布の測定に向けて

国立大学法人鹿児島大学
水田 敬

本プロジェクトのターゲット

高輝度・小型LED水中照明における放熱システムの
キーデバイスであるフラットヒートパイプ型
ヒートスプレッタ内部の冷媒分布を測定



フラットヒートパイプの
高性能化に向けた知見を得る

研究開発背景 1

～漁業における漁灯の重要性～

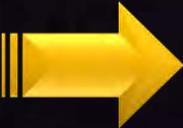
総漁獲量415万トン

灯火漁業:約147万トン

旋網(かつお・まぐろを除く)
約99万トン

いか釣り
約17万トン

サンマ棒受網
約31万トン



我が国の漁業においては、
漁灯を用いた灯火漁業が主流である

(平成21年度海面漁業の漁獲量。農林水産省ホームページより)

研究開発背景 2

～漁灯による大量のエネルギー消費～

特に、イカ釣り漁船などでは莫大な光量が必要(250 kW)
陸上競技場照明施設の約2倍のエネルギーを消費



巨大な発電機を搭載しなければならず、
イニシャルコスト・ランニングコストとも非常に高い

急激な燃料価格上昇による漁業操業停止
我が国における食料安定供給の脅威



低エネルギー消費型灯火漁業の実現が必須

研究開発背景 3

～灯火漁業に使用される照明について～



電球(白熱電球, ハロゲン灯)

メリット

- ・安価
- ・入手しやすい
- ・明るい



メタルハライド灯

デメリット

- ・大電力が必要
- ・光力競争
- ・指向性が低い



発光ダイオード(LED)

メリット

- ・消費電力が小さい
 - ・多様な波長を出せる
 - ・光力制御ができる
- etc.

電力消費の大きい光源から省電力のLEDへ

研究開発背景 4

～従来の高輝度LED照明における課題～

大光量の照明を実現するためには高輝度LEDが必要だが、高輝度LEDチップにおいては、数mm角の領域から光に変換されなかった大量の熱が放出される

最新LEDチップにおいては、
熱流束は 10 MW/m^2 にも達する
(H2Aロケットブースターレベル！)



Fig. H2Aロケット
(JAXAホームページより)

既存の冷却技術では十分な冷却性能を実現できないため、多数のLEDを広い間隔で実装して点灯させている



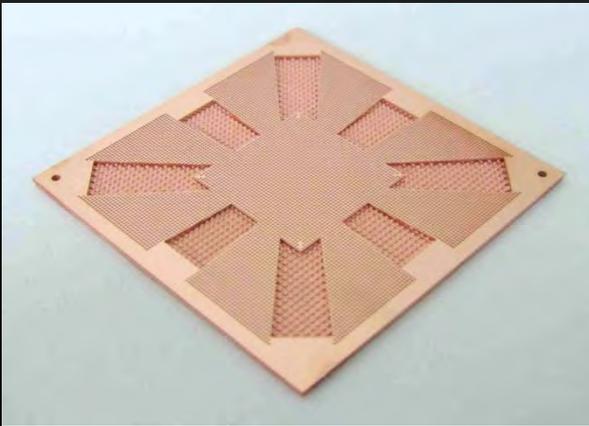
大型化・コストの上昇、
低輝度化を招いている

シース技術について1

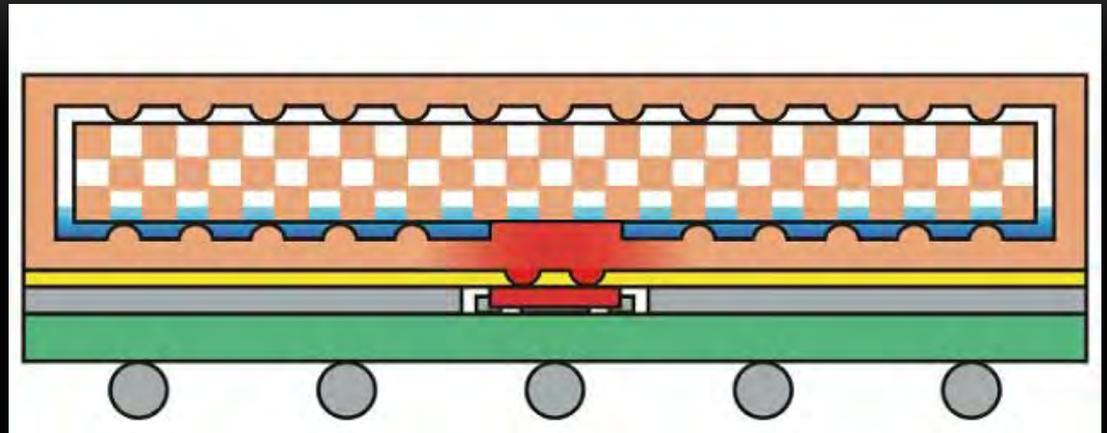
ジャンクション温度抑制による 高輝度・長寿命化技術

～FGHPをコアとした高性能冷却システム開発技術～

- ・ 内部にヒートパイプ構造を有するヒートパイプ型ヒートスプレッタ
- ・ (株)モレックス喜入社の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)



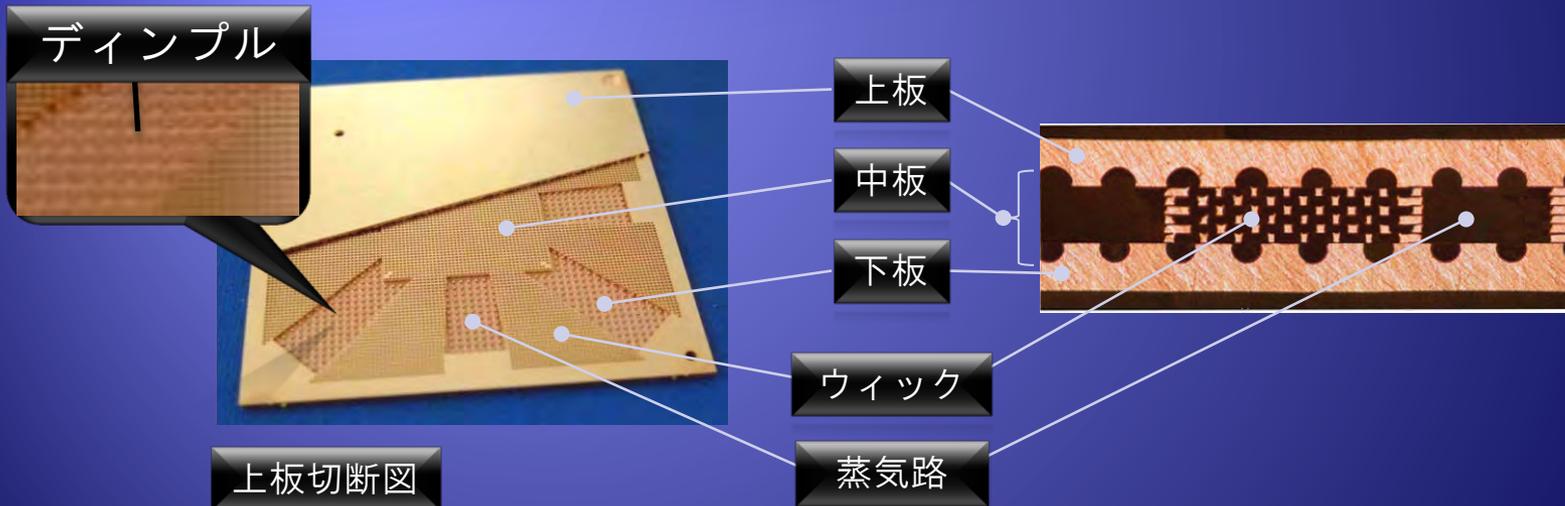
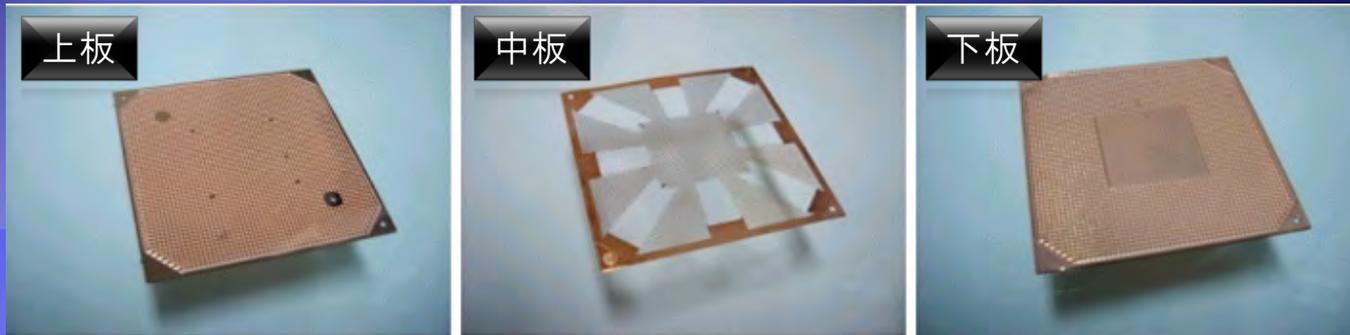
(i) FGHP 内部構造



(ii) FGHPの働きについて

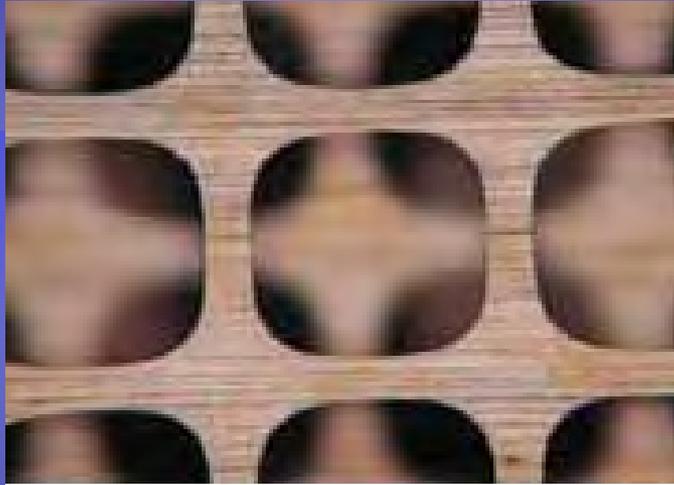
Fig. FGHPについて

FGHPの基本構造



- ・上板、中板、下板の3種類の銅板からなる積層構造体
- ・接着剤等は用いず、真空ホットプレスにより各銅板を直接接合
- ・積層体内部には真空下、冷媒を封入
- ・冷媒封入口は、銅ボールにより積層時と同様直接接合にて封止

FGHPの内部構造



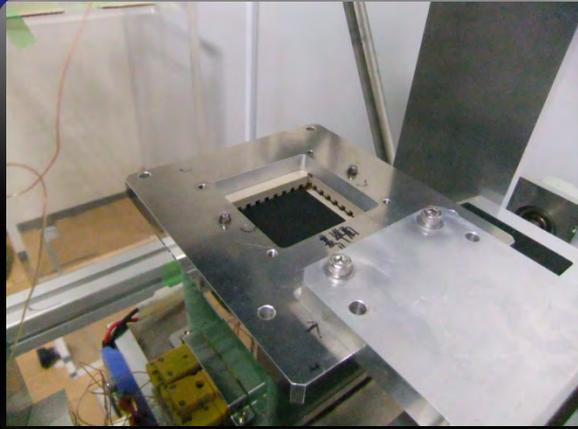
ウィックの構造（中板）



ディンプルの構造（上板、下板）

- ・中板部分にはウィックと呼ばれる毛細管流路部分と蒸気路と呼ばれる開口部が設けられている
- ・上板、下板にはディンプルと呼ばれる微小な突起が設けられており、突起間の溝は毛細管流路を形成するとともに表面積増大効果を持つ

温度分布平滑化効果の検証



- ・ 受熱部中央部より加熱し、放熱側をスポットクーラーで強制空冷
- ・ 熱源との間には、サーマルグリス (2 W/m · K, アイネックス製) を塗布
- ・ 上面温度分布を赤外線サーモグラフィ (TVS-200, 日本アビオニクス製) により測定

使用したサンプル

1. □65, 2 mm^t, 銅製ヒートスプレッダ
2. □65, 2 mm^t, FGHP
(内部□50 エリアがヒートパイプ構造)

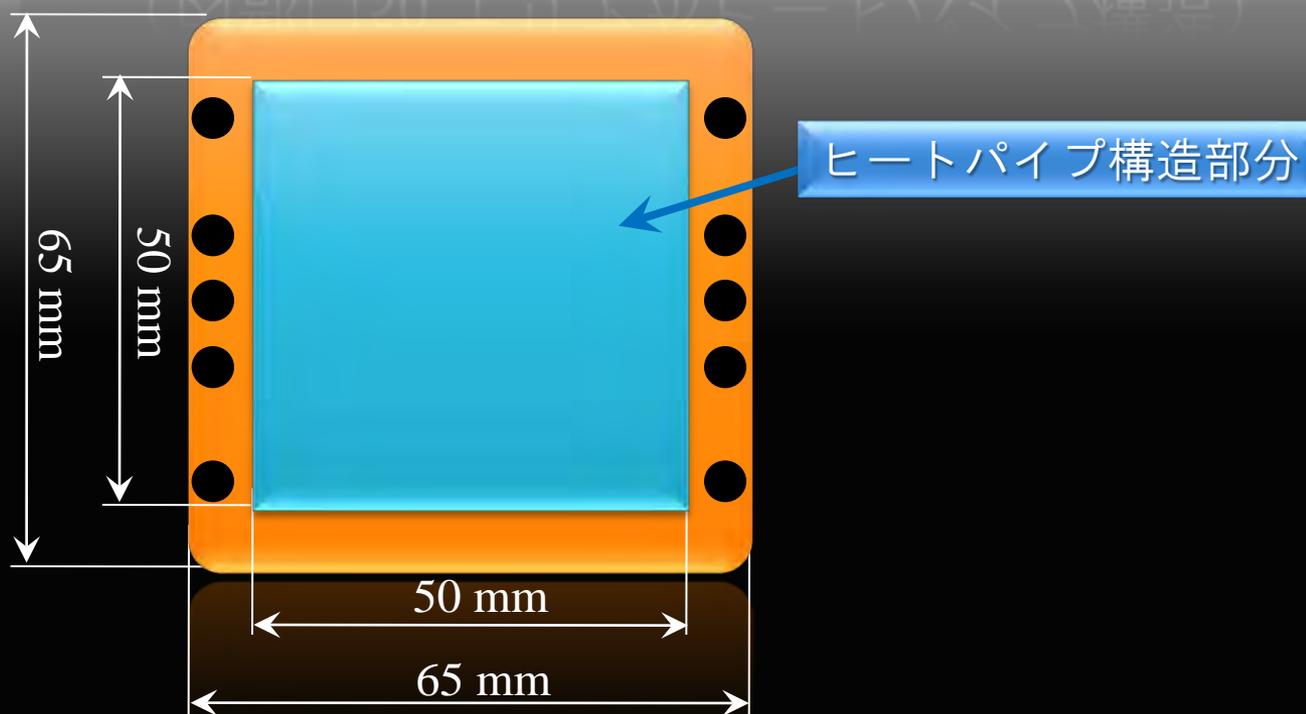
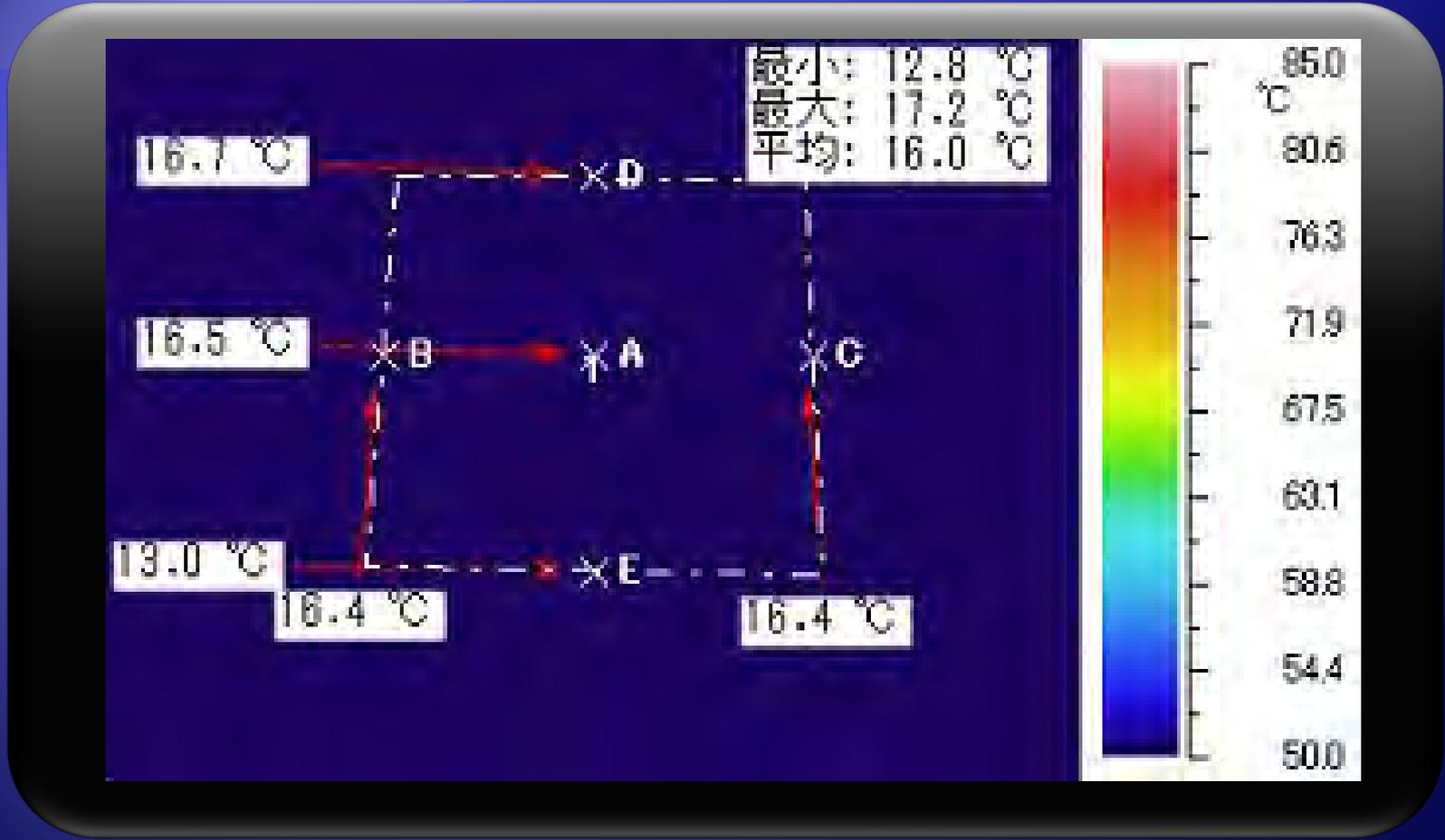
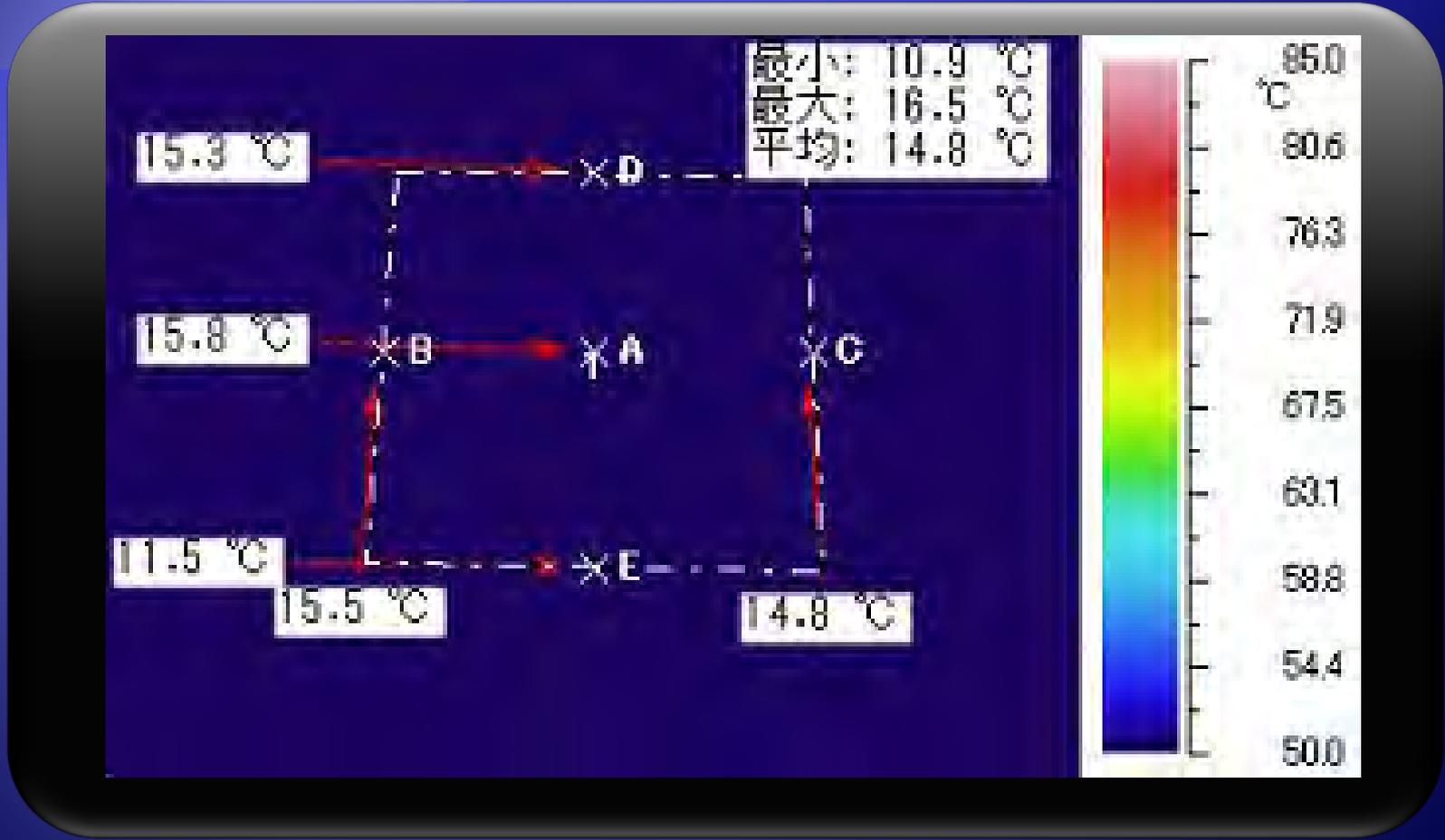


Fig. FGHPサンプル概略図

銅製ヒートスプレッダ



FGHP



優れた熱拡散性

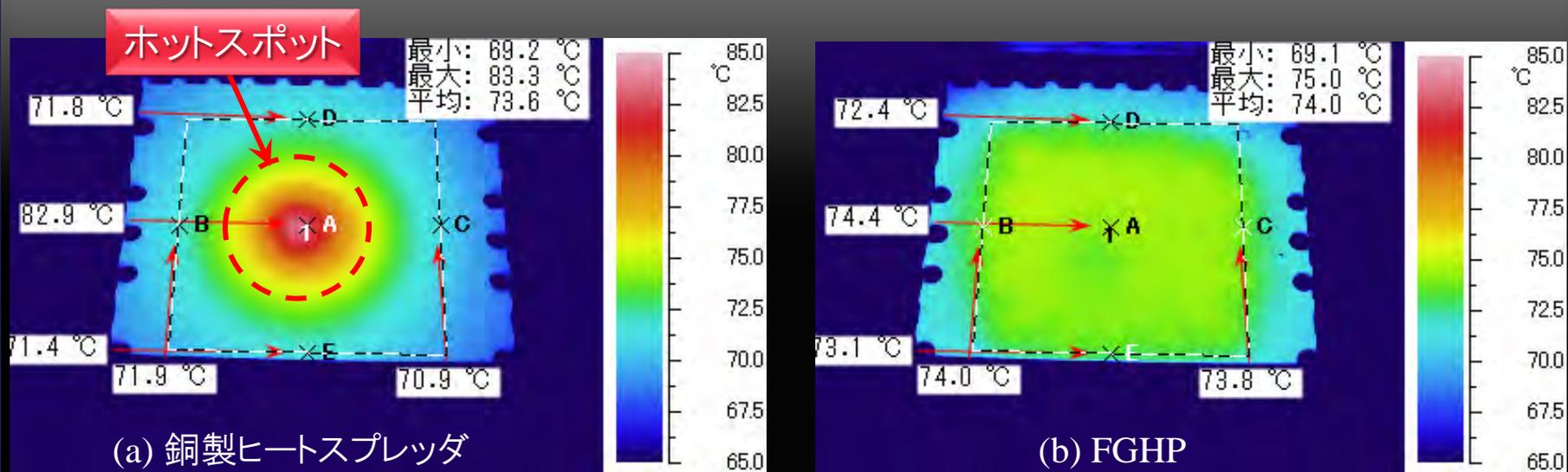


Fig. 赤外線サーモグラフィによる表面温度測定結果
(加熱開始から十分に時間が経過した後の定常状態における温度分布)

銅製ヒートスプレッダ: 中央部に**ホットスポット**が発生
FGHP: ホットスポットは観察されず、**温度はほぼ均一**



温度平滑化効果に優れている

使用したサンプル

1. □50, 2 mm^t, 銅製ヒートスプレッタ
2. □50, 2 mm^t, FGHP
(内部□50 エリアがヒートパイプ構造)

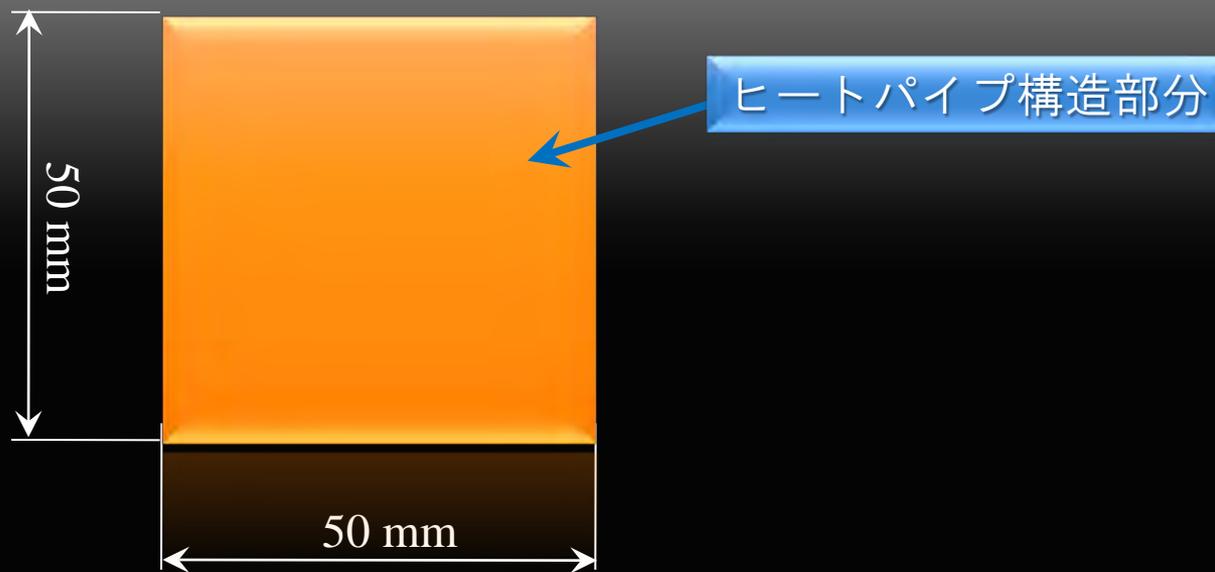


Fig. FGHPサンプル概略図

表面温度の測定について

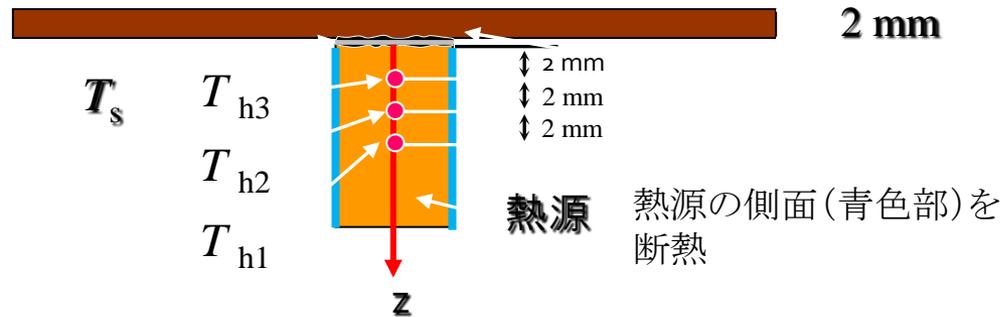


Fig. 熱源の熱電対設置位置

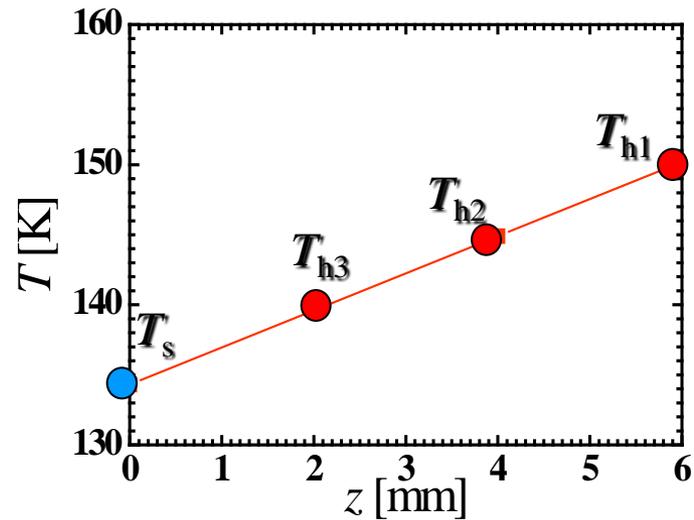
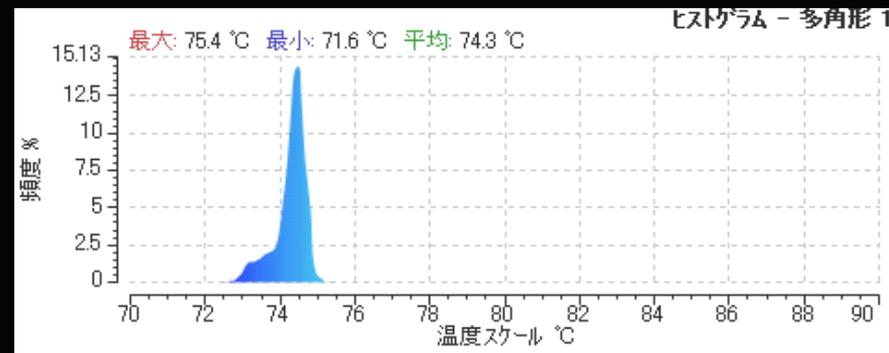
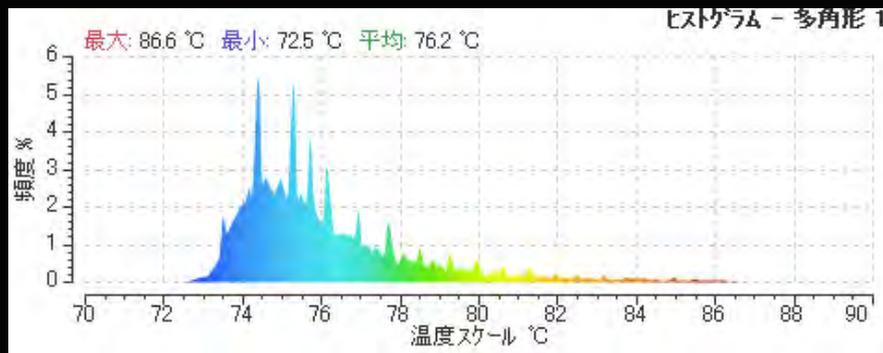
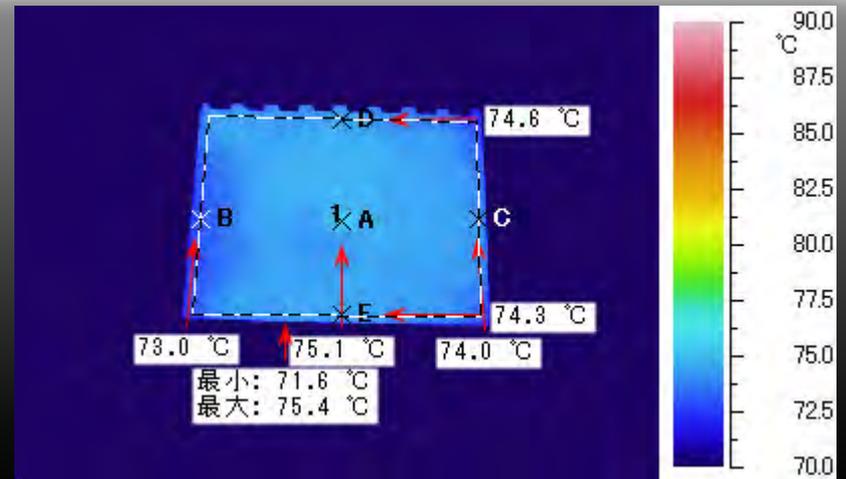
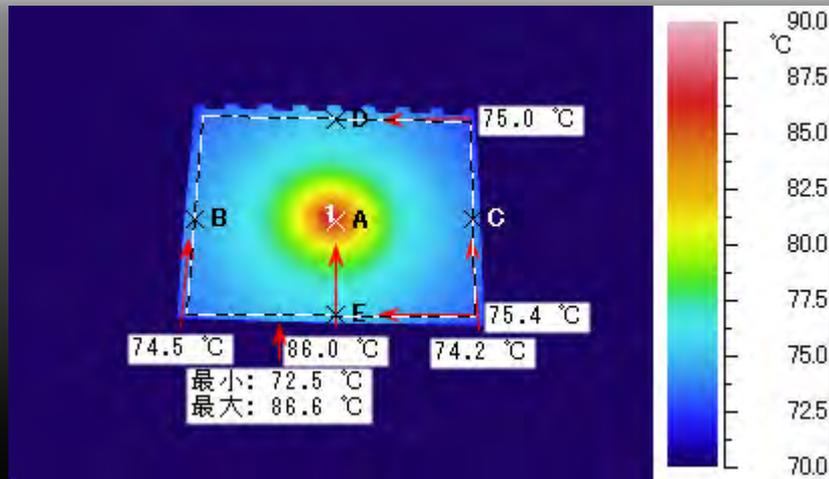


Fig. 熱源表面温度 T_s の推定

サーモグラフィ評価結果



(a) 銅製ヒートスプレッダ

(b) FGHP

Fig. 赤外線サーモグラフィによる表面温度測定結果
(加熱開始から十分に時間が経過した後の定常状態における温度分布)

熱抵抗低減効果について1

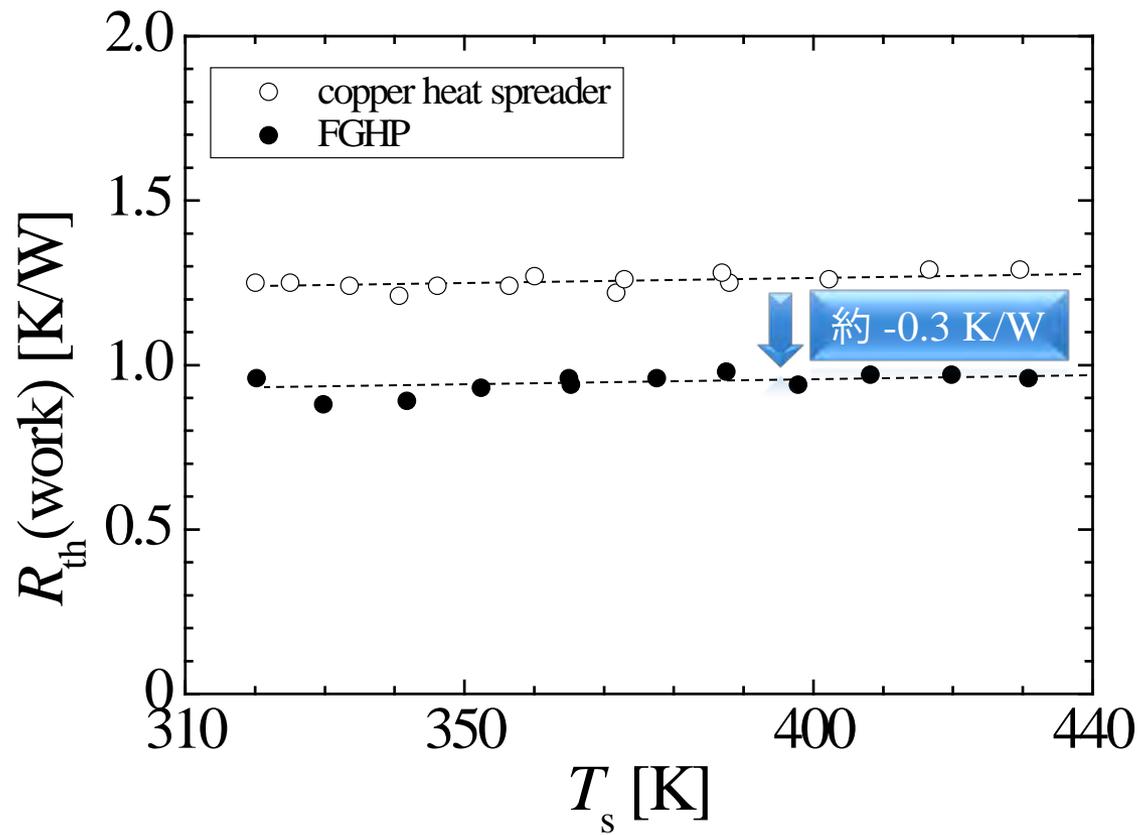


Fig. ワーク熱抵抗の比較

熱抵抗低減効果について2

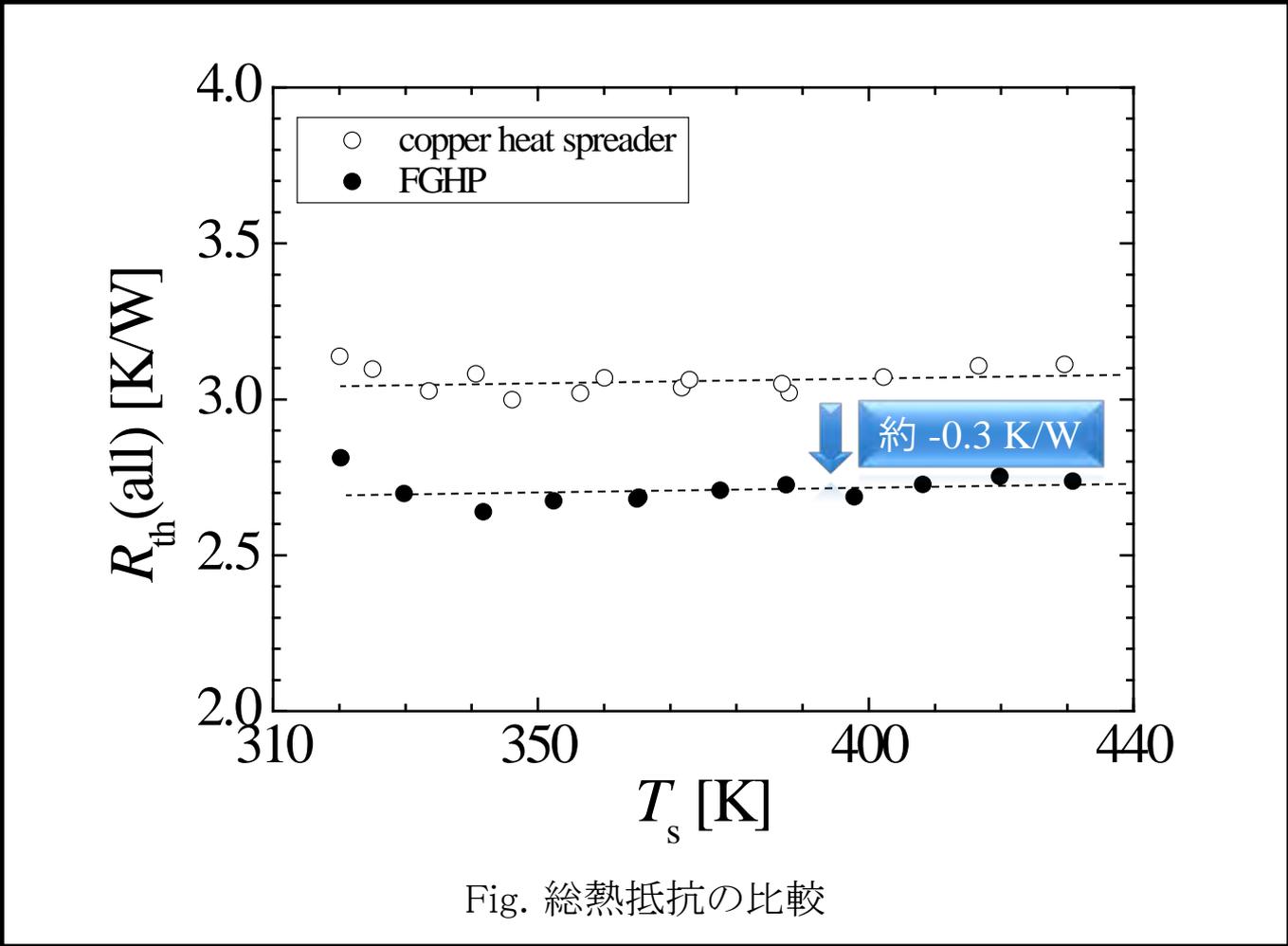
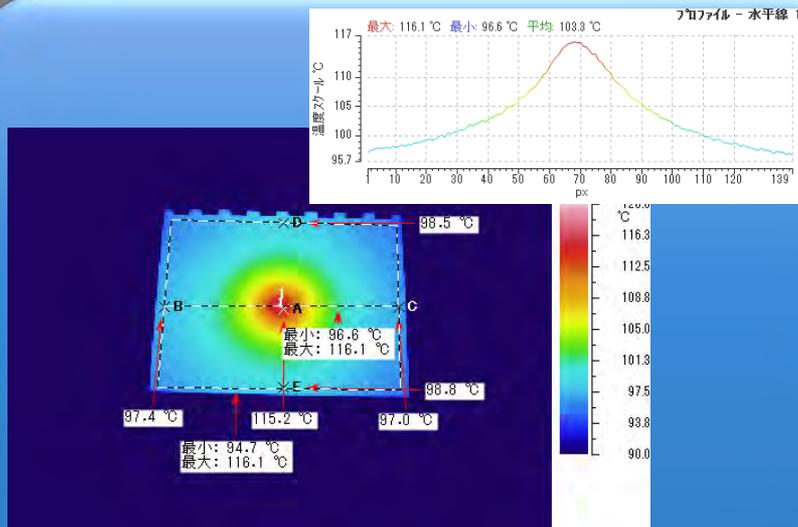
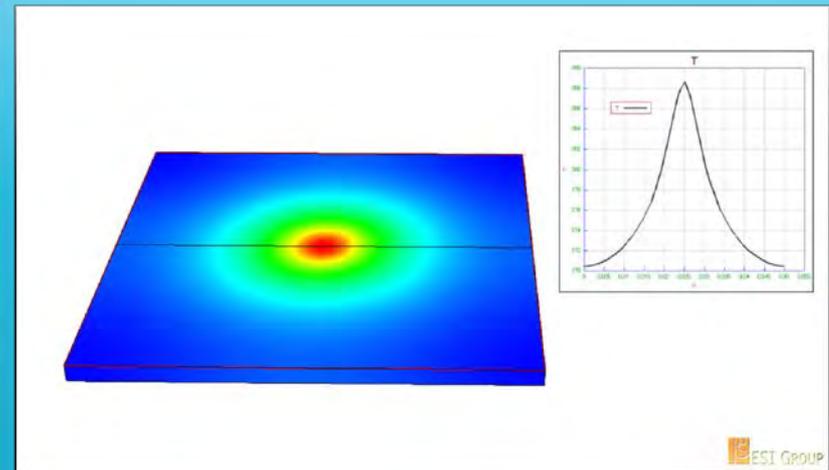


Fig. 総熱抵抗の比較

有効熱伝導率の推定



(a) サーモグラフィによる測定値



(b) シミュレーション結果

Fig. サーモグラフィによる測定値とシミュレーション結果との比較

実装した状態におけるサーマルシミュレーションを実施するために、有効熱伝導率を推定

有効熱伝導率の推定方法

1 境界条件の推定

CFD-ACE+を用いてサーマルシミュレーションを実施し、銅板についての温度分布の実測値と、シミュレーションにより求めた温度分布の一致性が高くなる様、サーマルグリスの厚み、上面の熱伝達係数を決定した

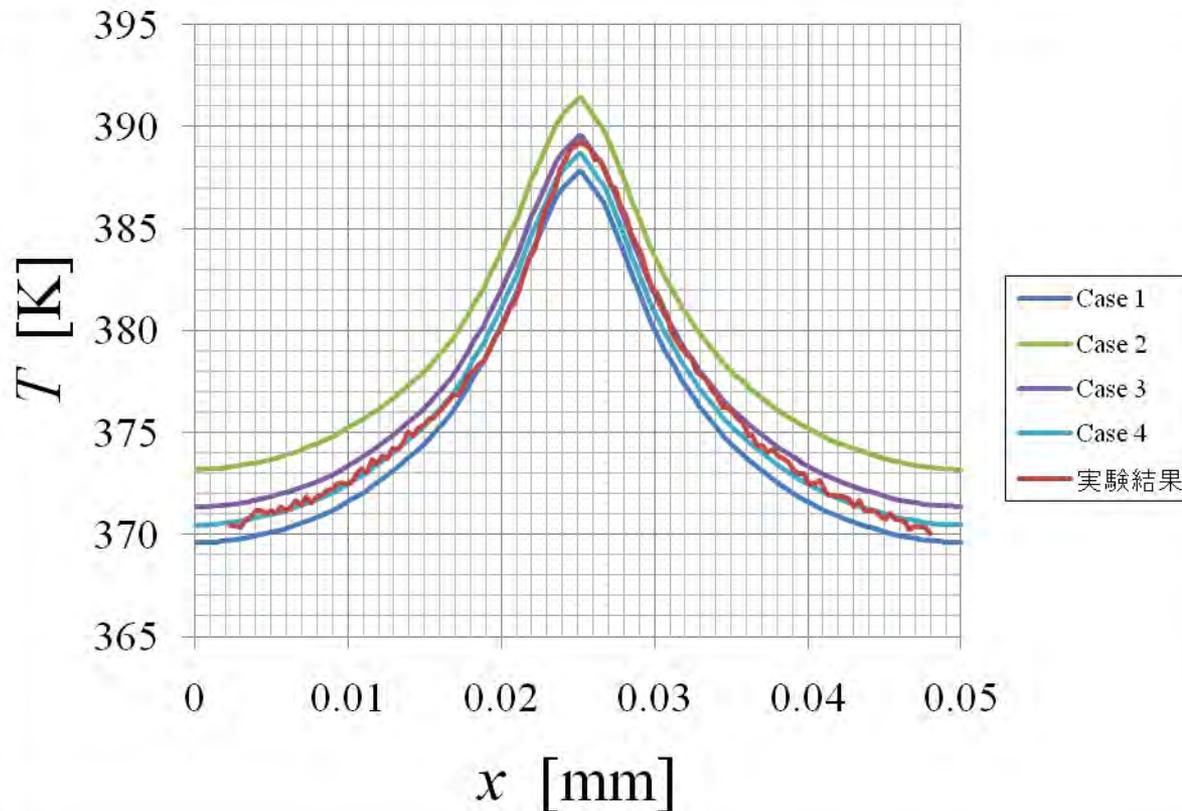
2 FGHP温度分布の一致性確認

1で推定した境界条件をもとに、様々な熱伝導率のヒートスプレッタに対し、シミュレーションを行い、FGHPに関する温度分布の実測値と比較した

3 FGHPの有効熱伝導率の推定

2の結果より、熱源表面温度と熱伝導率の関係を求め、FGHP使用時の熱源表面温度の測定値により有効熱伝導率を推定した

境界条件の決定



銅製ヒートスプレッダに関するサーモグラフィによる温度分布測定結果とシミュレーションによる分布が最もよく一致する条件から境界条件を推定

Fig. 銅製ヒートスプレッダの上面温度プロファイルを比較

有効熱伝導率の決定

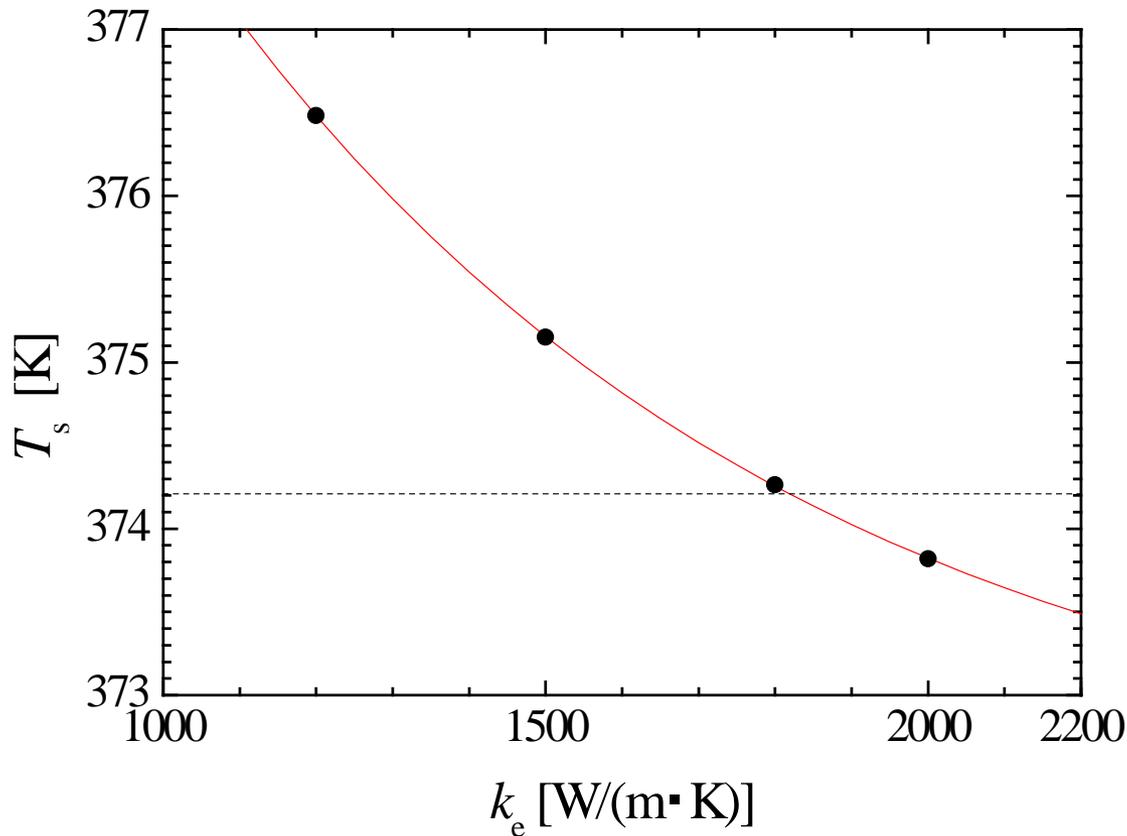


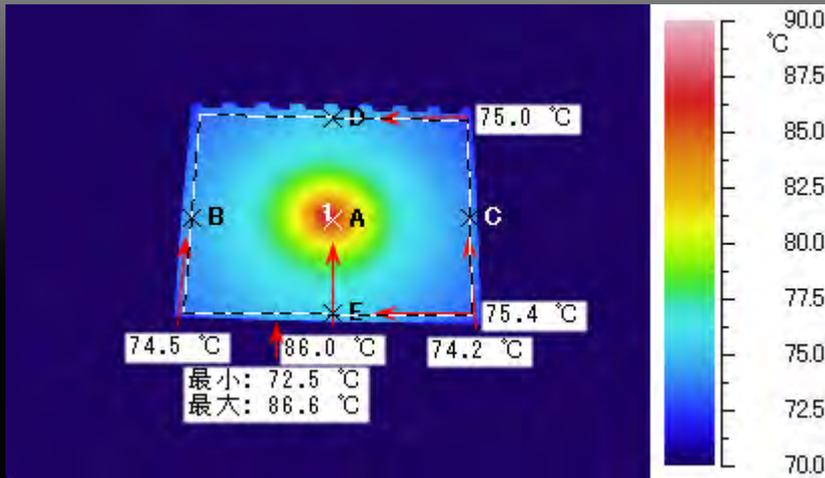
Fig. 熱伝導率による熱源表面温度推定値の変化

ヒートスプレッダの熱伝導率を変化させた場合の表面温度推定値の変化から有効熱伝導率を推定

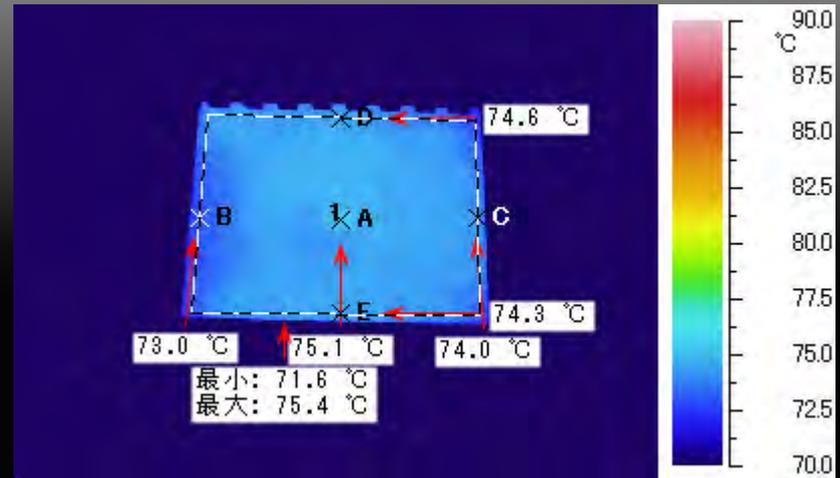


k_e は
約 1.8×10^3 W/(m · K)

高い熱拡散性能を有するFGHP



(a) 銅製ヒートスプレッダ



(b) FGHP

Fig. 赤外線サーモグラフィによる表面温度測定結果
(加熱開始から十分に時間が経過した後の定常状態における温度分布)

サーモグラフィ評価結果とシミュレーション結果より、

FGHPの有効熱伝導率は約 $1.8 \times 10^3 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$

FGHP冷却システムに関連する 研究開発状況について

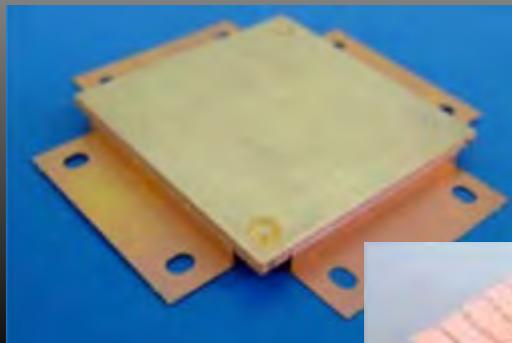


Fig. 排熱パス付

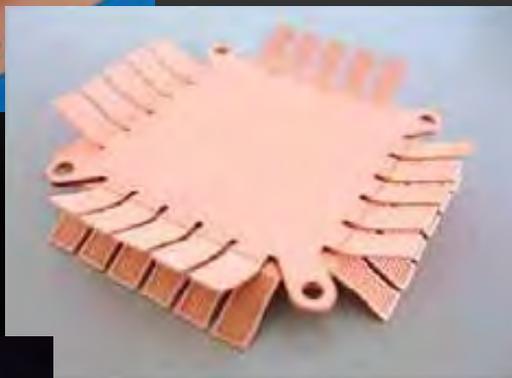


Fig. フィンー体型



Fig. 回路一体形成型

FGHPの特性を有効に利用
するために種々の開発を実
施しており、さらなる高性
能化や適用性の拡大に向け
て研究開発を実施

中性子ラジオグラフィーによる可視化例

京都大学原子炉実験所齊藤先生による撮影結果より、内部構造を可視化することは可能であることがわかった



イニシャル状態で冷媒はどこに分布しているか？

ドライスタート時の特性を把握する上で重要

FGHPを用いた水中LED照明の開発について

筐体の放熱設計 ～実用化を見据えた構成について～



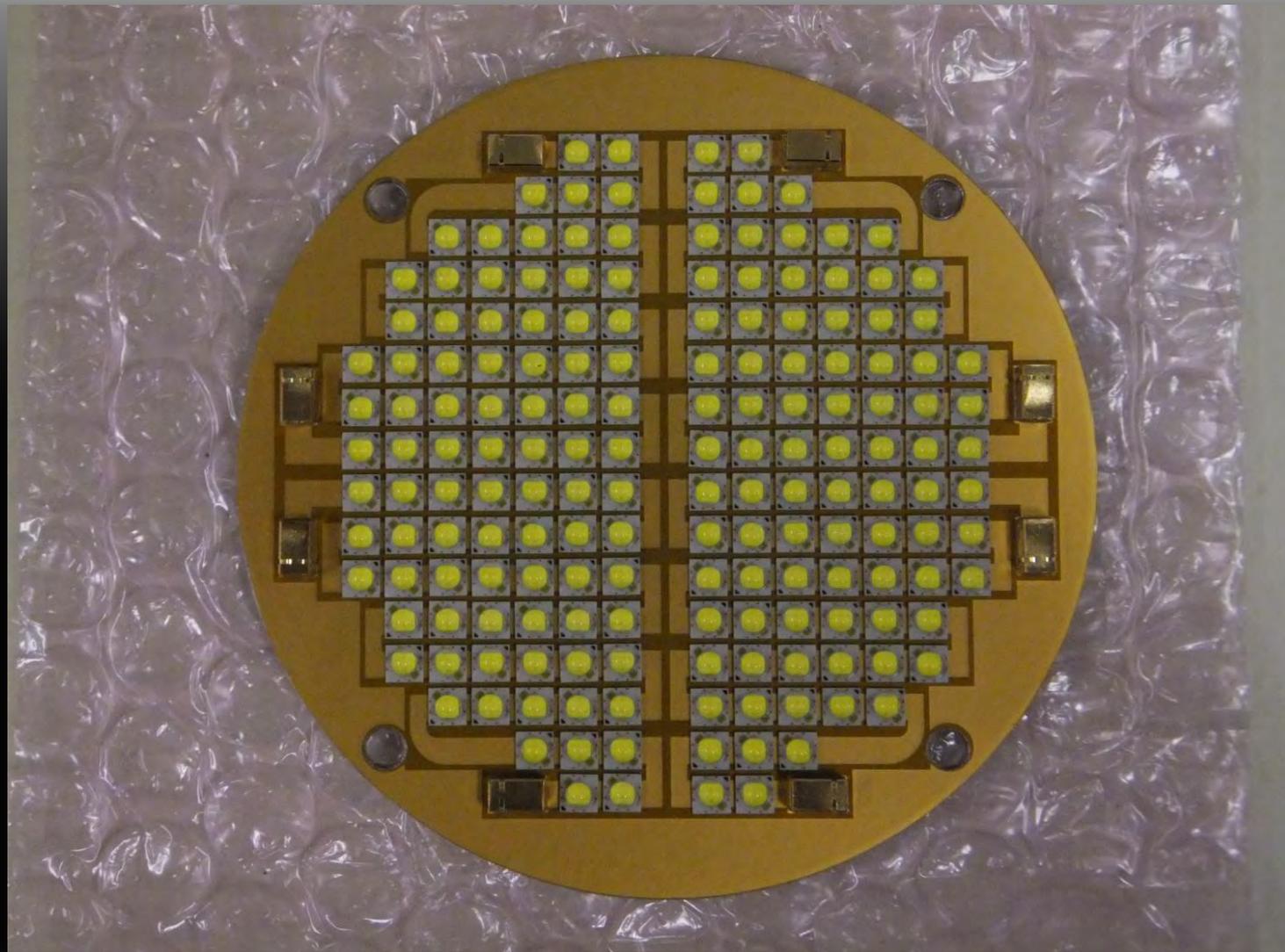
小型・高輝度水中LED照明

シンプルな構成ながら、FGHPの性能を引き出す
構成をシミュレーションにより決定

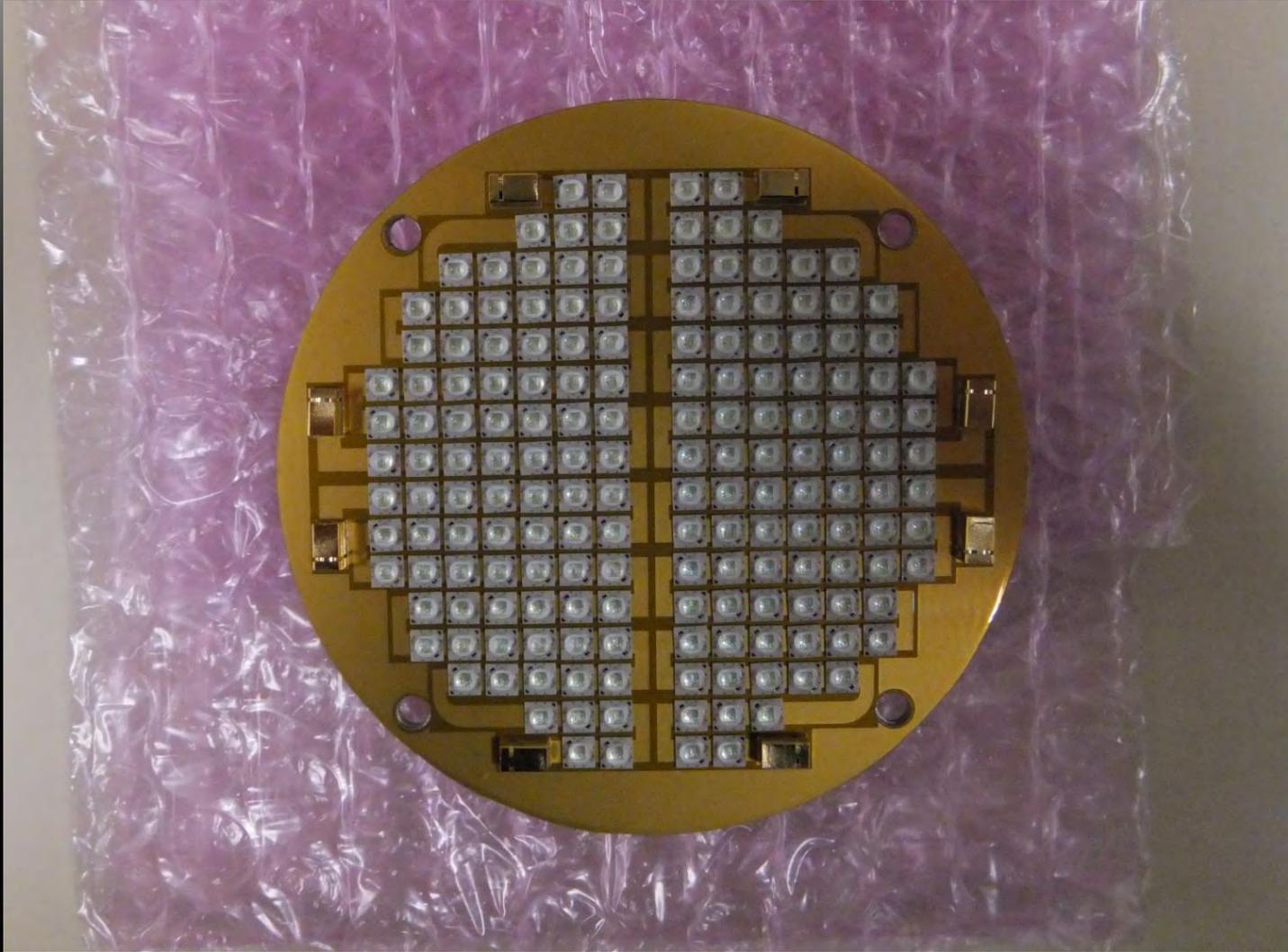
LED基板を搭載した筐体（プロトタイプ）



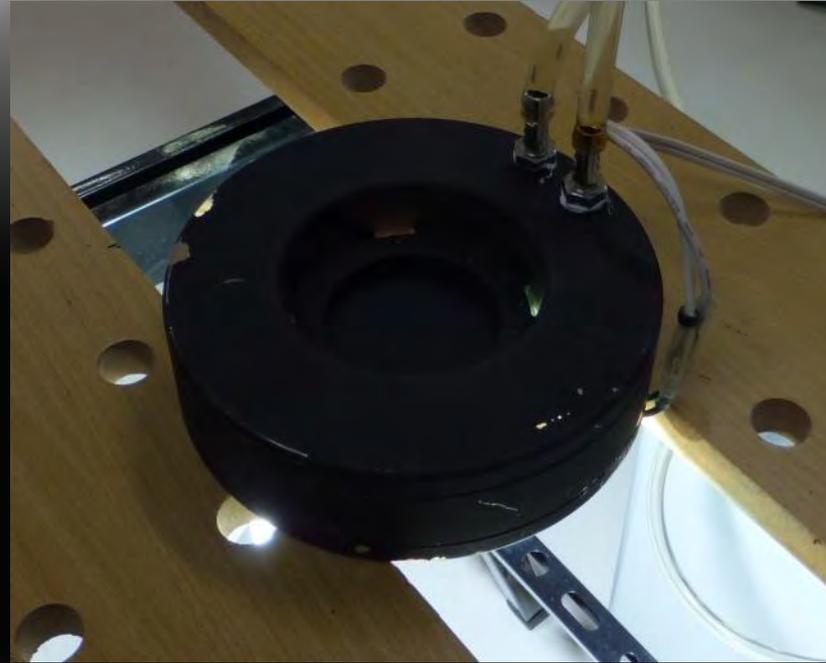
LEDを実装したFGHP基板（日亜化学工業社製白色）



LEDを実装したFGHP基板（日亜化学社工業製青緑色）



放熱特性評価実験

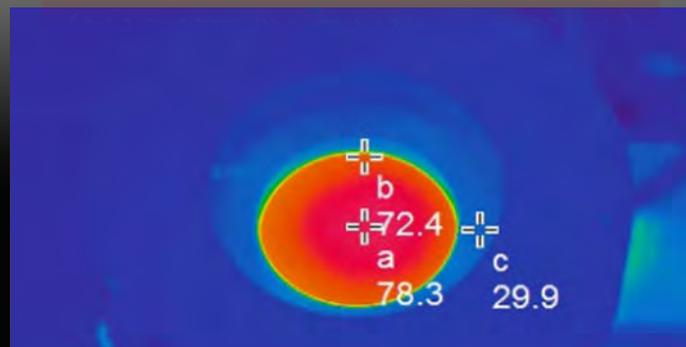


空中点灯用液冷ジャケットを装着した筐体を定電流(1系統あたり0.35 A)で駆動し、温度分布ならびに電流・電圧特性を調べた

Fig. 放熱特性評価実験

従来技術に対する優位性に関して

従来技術
(銅製基板を用いた場合)



基板中心温度：351.4 K
中心と周辺温度差：約6 K

本研究開発
(FGHP基板を用いた場合)



基板中心温度：340.4 K
中心と周辺温度差：0.2 K

本研究開発は従来技術に比べて・・・

基板中心温度：約11 K低減



アレニウスの法則より半導体寿命を2倍超に伸ばす効果

中心温度と周辺温度との差：約30分の1



・面内での発光強度のムラを抑制可能
・LEDの寿命の偏りを低減する効果
(過大な寿命設計の防止)

従来技術に対して本研究開発は大きな優位性を実現

LED基板を搭載した筐体（鍛造版筐体）

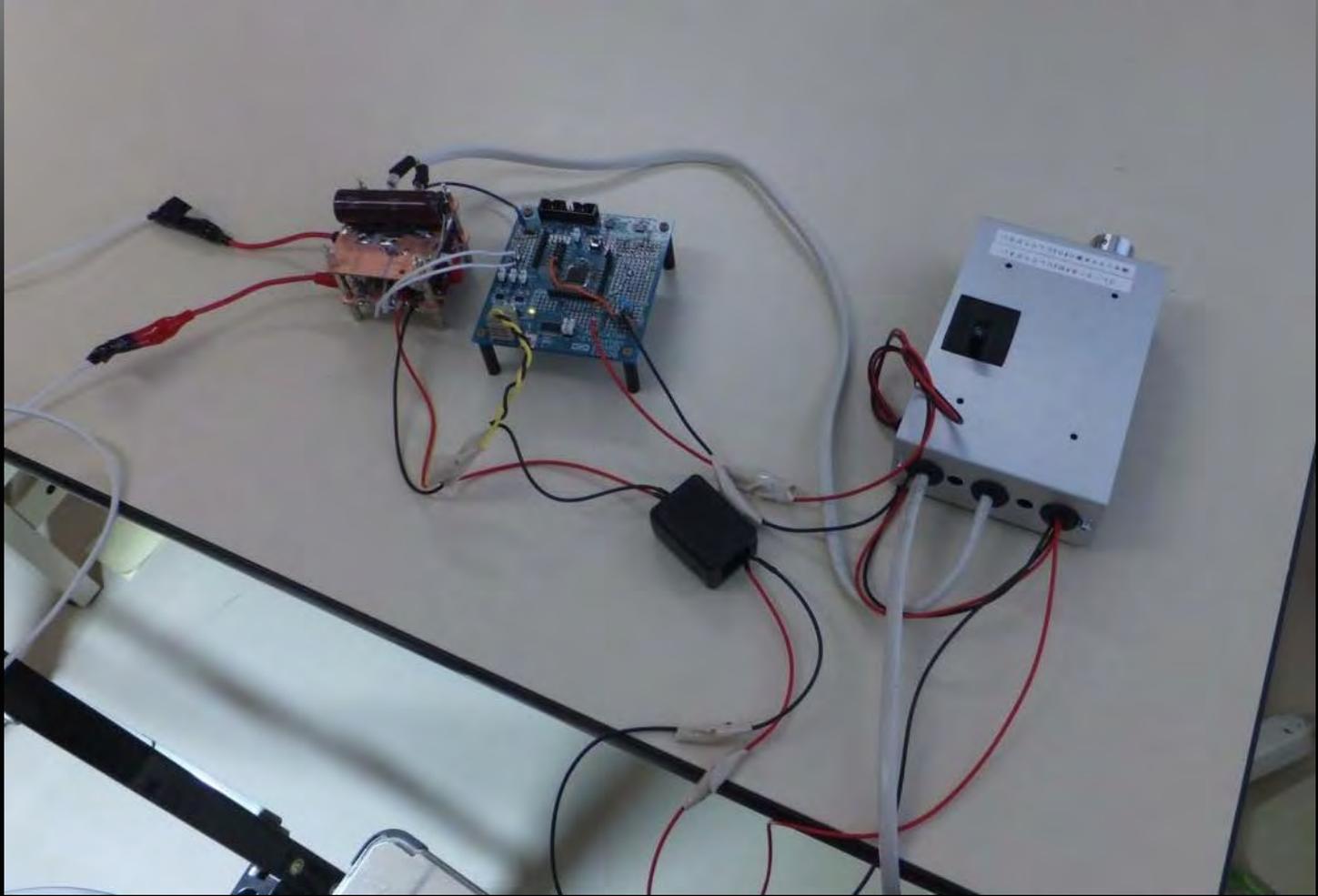


- ・ 直径：115 mm
- ・ 高さ：52 mm (突起含まず)
- ・ 投入電力：180 W
- ・ 全光束：18,000 lm (180 W入力時)
40,000 lm (400 W投入時, 白色)
- ・ 放熱部材質：真鍮
- ・ 下面カバー材質：アクリル
- ・ 重量：真鍮シェル：約2 kg
- ・ 発光色：白、緑、青緑 他

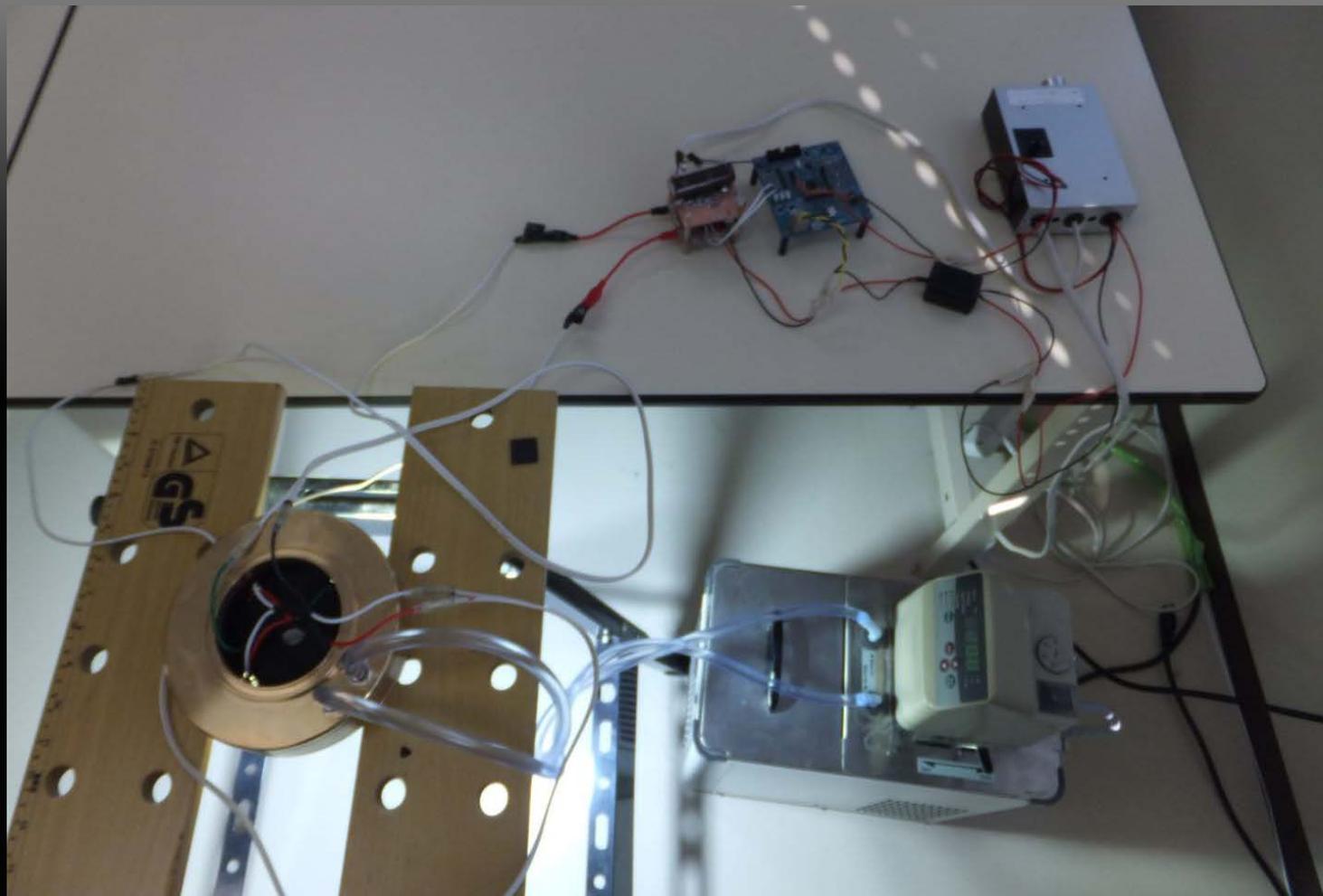


用途によって構成を変更可能

小型内蔵型電源 rev. 1



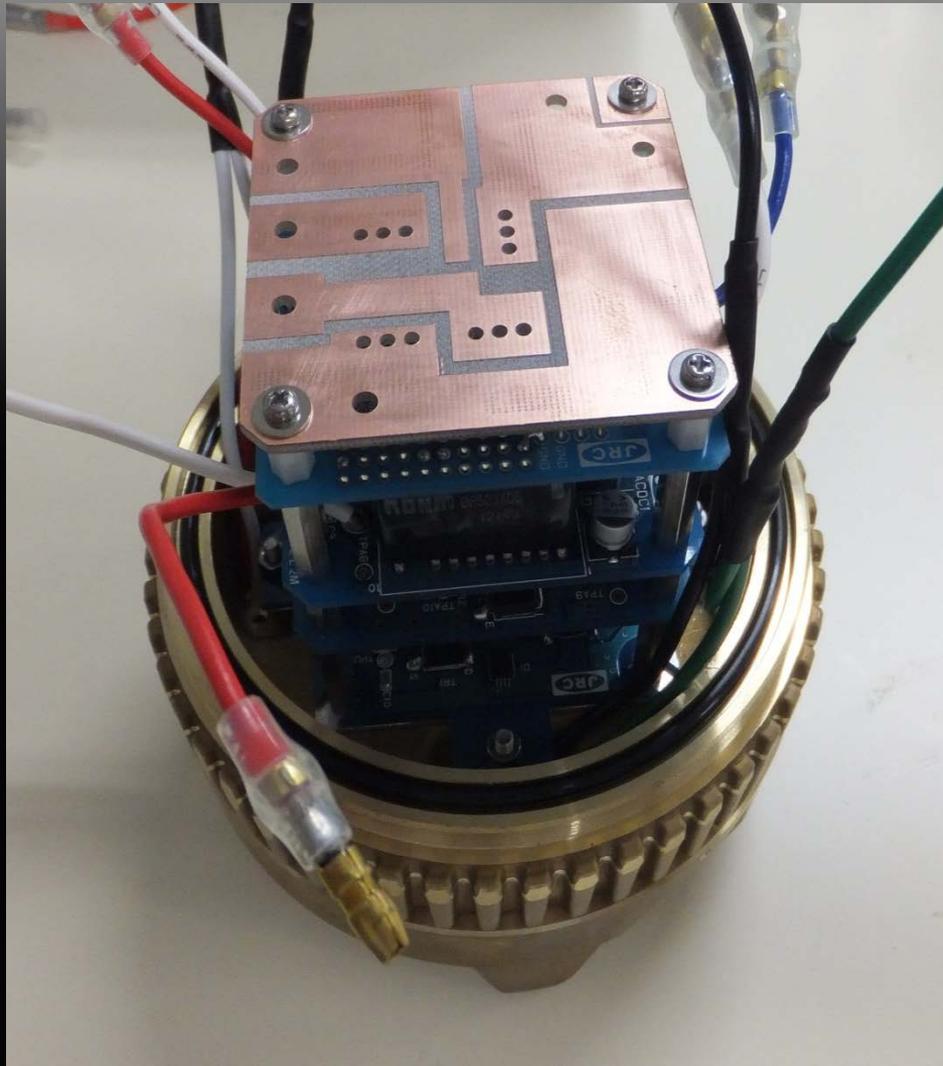
小型内蔵型電源 rev. 1による点灯試験



小型内蔵型電源 rev. 1による点灯試験



小型内蔵型電源 rev. 4



小型内蔵型電源 rev. 4と電源内蔵型筐体



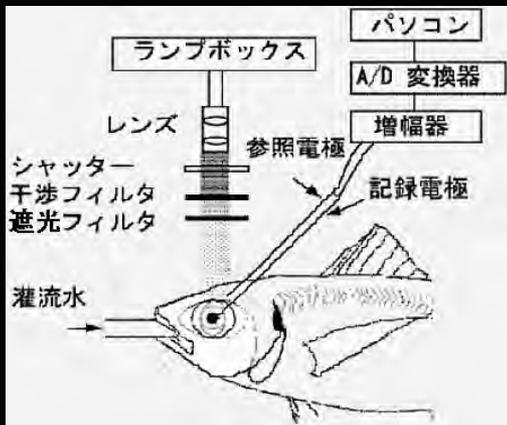
シーズ技術について2

波長選択による省エネルギー化技術

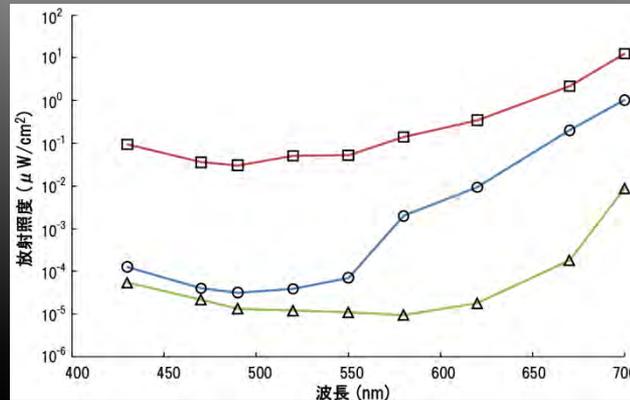
～科学的根拠に基づく有効波長決定技術～



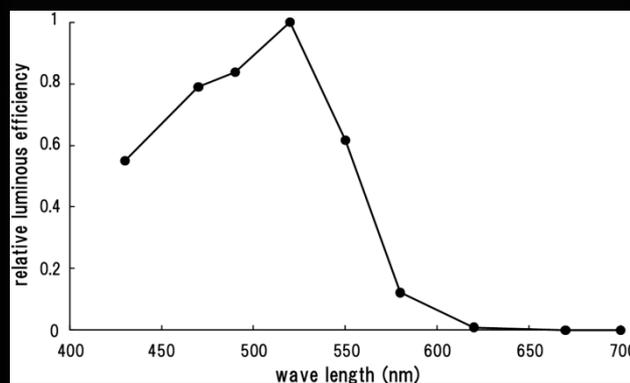
マアジ *Trachurus japonicus*



ERG装置概略



絶対閾値



比視感度(マアジの例)

魚類の網膜細胞を用いた ERG測定により、光刺激に対する応答性を波長帯ごとに定量化することが可能

電気生理学的手法によるのスペクトル感度の計測



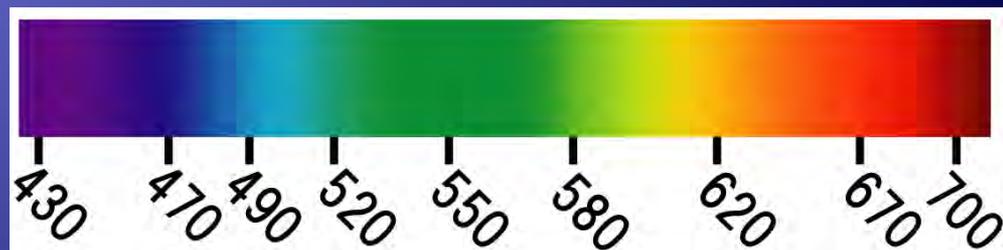
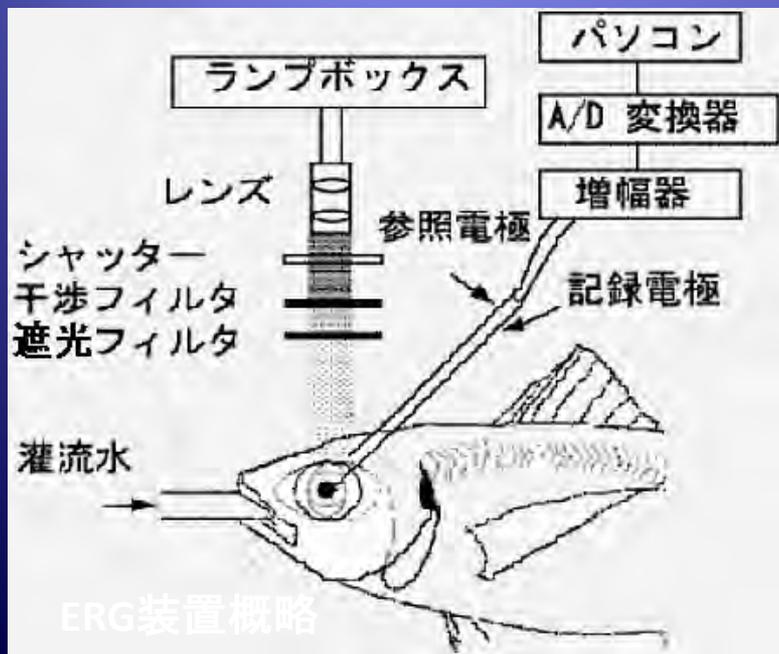
マアジ *Trachurus japonicus*



サンマ *Cololabis saira*

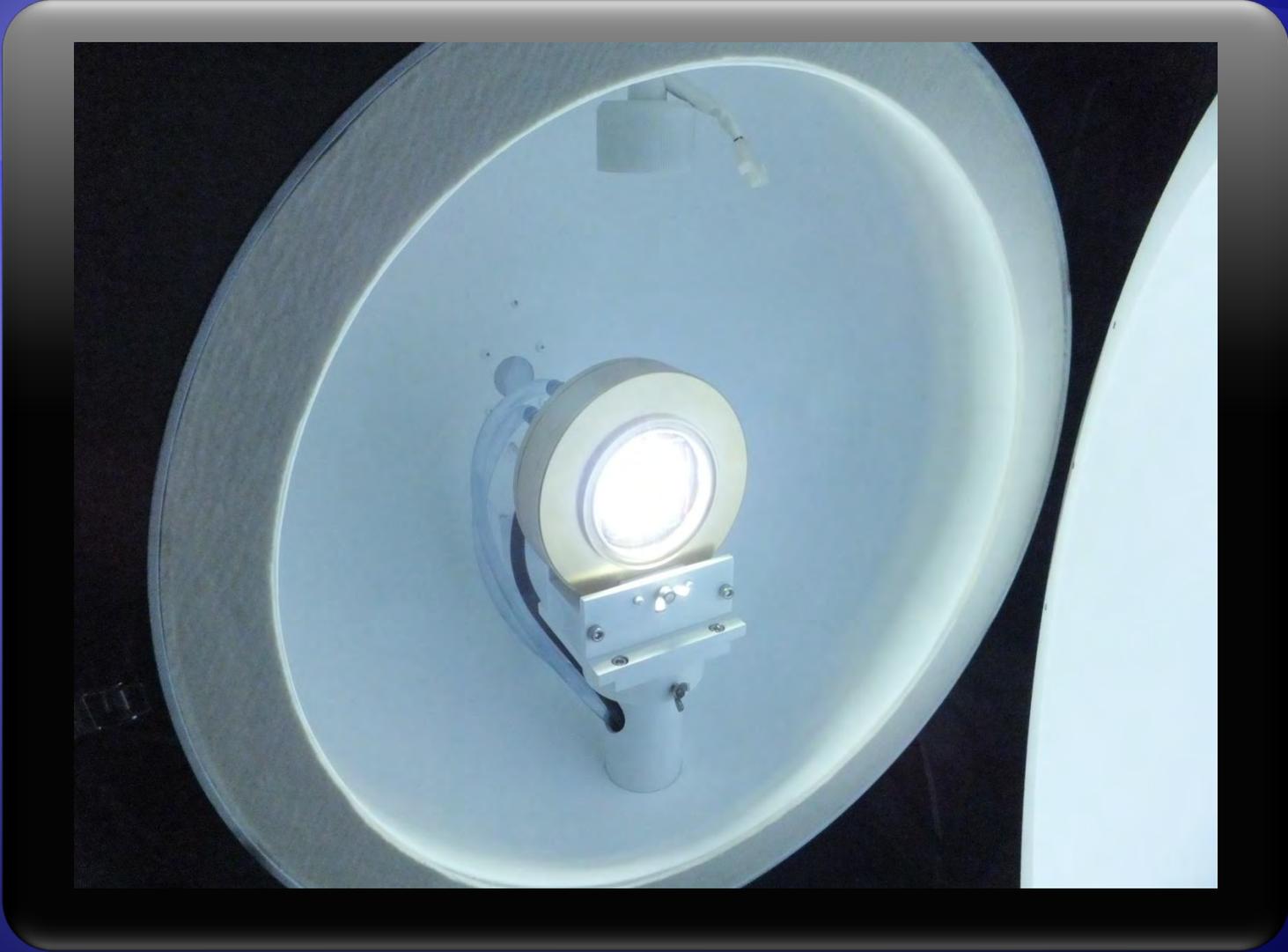


コイ *Cyprinus carpio*



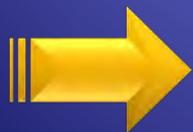
刺激光の λ_{MAX}

全光束とスペクトル特性の評価



魚類の視覚特性に対する適応性の検討

	サンマに対する 適応率 [%]	全光束 [lm] (170 W投入時)	有効発光エネルギー [lm]
クリー社製白色	35.7	1.78E+04	6.35E+03
日亜化学社製白色	31.4	1.66E+04	5.21E+03
東芝社製白色	25.1	1.14E+04	2.86E+03
クリー社製緑色	68.3	1.34E+04	9.15E+03
日亜化学社製青緑	82.3	1.37E+04	1.13E+04



対象に対して適切なスペクトル特性のLEDを選択することにより、有効なエネルギー成分が増加